

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа – ИШИТР

Направление подготовки – Стандартизация и метрология

Отделение школы (НОЦ) – ОАР

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Градуировка средств измерений по экспериментальным данным методом регрессионного анализа

УДК 519.233.53.089.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ61	М.В. Власова		

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ВКР	С.В. Муравьев	Доктор техн. наук, профессор		
Руководитель ООП	В.Ю. Казаков	Кандидат физ.-мат. наук, доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Н.В. Шаповалова			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	И.И. Авдеева			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОАР	С.В. Леонов	Кандидат техн. наук		

Томск – 2018 г.

Планируемые результаты обучения по направлению 27.04.01

«Стандартизация и метрология»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P1	Применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для решения комплексных задач метрологического обеспечения, контроля качества, технического регулирования и проверки соответствия с использованием существующих и новых технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения	Требования ФГОС (ОК-12, 13, 15, 16, 19; ПК- 17, 18, 19, 21, 22, 26). Критерий 5 АИОР (п.1.1, 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	Выполнять работы по метрологическому обеспечению и техническому контролю, определять номенклатуру измеряемых и контролируемых параметров, устанавливать оптимальные нормы точности и достоверности контроля, выбирать средства измерений и контроля, предварительно оценив экономическую эффективность техпроцессов, кроме того, уметь принимать организационно-управленческие решения на основе экономического анализа	Требования ФГОС (ОК-5, ПК-3, 4, 8, 12, 23, 24). Критерий 5 АИОР (п.1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	Выполнять работы в области стандартизации и сертификации: по созданию проектов стандартов, методических и нормативных материалов и технических документов, по нормоконтролю и экспертизе технической документации, участвовать в проведении сертификации продукции, услуг, систем качества и систем экологического управления предприятием, участвовать в аккредитации органов по сертификации, измерительных и испытательных лабораторий	Требования ФГОС (ОК-17, 19; ПК- 1, 6, 7, 8, 11, 14, 16, 17, 18, 21, 24). Критерий 5 АИОР (п.1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	Выполнять работы в области контроля и управления качеством: участвовать в оперативной работе систем качества, анализировать оценку уровня брака и предлагать мероприятия по его предупреждению и устранению, участвовать в практическом освоении систем менеджмента качества	Требования ФГОС (ОК-3, 9, 15, ПК-2, 5, 11, 12, 13, 15, 21). Критерий 5 АИОР (п. 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	Использовать базовые знания в области экономики, проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения комплексной инженерной деятельности; проводить анализ затрат на обеспечение требуемого качества и деятельности подразделения, проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных решений	Требования ФГОС (ОК-8, 9, 18, ПК-10, 25). Критерий 5 АИОР (п.2.1, 1.3, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
<i>Универсальные компетенции</i>		
P6	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-3, 4, 5). Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P7	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, демонстрировать ответственность за результаты работы	Требования ФГОС (ОК-3, 18, ПК-26). Критерий 5 АИОР (п.2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>

Продолжение таблицы

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, представлять и защищать результаты инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-17,19). Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а также различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду	Требования ФГОС (ОК-1, 13, 14, ПК-26). Критерий 5 АИОР (п.2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-6, 7). Критерий 5 АИОР (п.1.6, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа – ИШИТР

Направление подготовки – Стандартизация и метрология

Отделение школы (НОЦ) – ОАР

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ61	Власовой Марии Владимировне

Тема работы:

Градуировка средств измерений по экспериментальным данным методом регрессионного анализа	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 2585/с от 13.04.2018

Срок сдачи студентом выполненной работы:	19.06.2018
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является один из способов уменьшения систематической погрешности – градуировка средств измерений. Рассматривается подход к обработке экспериментальных данных, полученных для средств измерений одного типа, позволяющий построить градуировочную характеристику СИ с минимизированной систематической составляющей погрешности.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Особенности метода индивидуальной градуировки средств измерений. Оценивание показателей точности методик и результатов измерений. Построение линейных градуировочных характеристик методом наименьших квадратов. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. Социальная ответственность. Выводы по результатам работы.</p>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)		Презентация	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)			
Раздел		Консультант	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение		Н.В. Шаповалова	
Социальная ответственность		И.И. Авдеева	
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:			
Градуировочные характеристики СИ, задача построения ГХ СИ, порядок построения ГХ, методы построения ГХ, регрессионный анализ: метод наименьших квадратов, объединение результатов измерений, наилучшая оценка множества измерений, среднее (взвешенное) значений			

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОАР	С.В. Муравьев	Доктор техн. наук, профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ61	М.В. Власова		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа – ИШИТР

Направление подготовки – Стандартизация и метрология

Уровень образования – магистратура

Отделение школы (НОЦ) – ОАР

Период выполнения – осенний / весенний семестр 2017/2018 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	19.06.2018
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
11.03.2018	Особенности метода индивидуальной градуировки средств измерений	25
4.04.2018	Оценивание точности методики выполнения измерений	25
5.05.2018	Построение линейных градуировочных характеристик методом наименьших квадратов	25
10.05.2018	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
12.05.2018	Социальная ответственность	10
20.05.2018	Выполнение раздела на иностранном языке	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОАР	С.В. Муравьев	Доктор техн. наук, профессор		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР	В.Ю. Казаков	Кандидат физ.-мат. наук		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ61	Власовой Марии Владимировне

Школа	ИШИТР	Отделение	ОАР
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	27.04.01 Стандартизация и метрология

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Оклады участников проекта, нормы рабочего времени, ставки налоговых отчислений во внебюджетные фонды, районный коэффициент по г. Томску
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Потенциальные потребители результатов исследования. SWOT-анализ.
2. Разработка устава научно-технического проекта	Цели и результаты исследования, планирование участников исследования.
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Структура работ в рамках научного исследования. Определение трудоемкости выполнения работ. Составление графика проведения научного исследования. Определение бюджета научно-технического исследования.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Определение эффективности исследования

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Потенциальные потребители результатов исследования
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НИ
4. Оценка эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2018
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Шаповалова Наталья Владимировна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ61	Власова Мария Владимировна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ61	Власовой Марии Владимировне

Школа	ИШИТР	Отделение	ОАР
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	27.04.01 Стандартизация и метрология

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является один из способов уменьшения систематической погрешности – градуировка средств измерений. Область применения: стандартизация и метрология, измерительная техника, электроника. Рабочее место представляет собой компьютерный стол с ПК
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения. 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.	При анализе вредных факторов возможно выявление следующих факторов: – отклонение показателей микроклимата; – недостаточная освещённость рабочей зоны; – повышенный уровень электромагнитных излучений; – повышенный уровень шума на рабочем месте; – длительность сосредоточенного наблюдения. Существует вероятность поражения статическим электричеством, поражение электрическим током в процессе работы с электрооборудованием, а также короткое замыкание.
2. Экологическая безопасность	Негативного воздействия разрабатываемого объекта на окружающую среду не происходит, т.к. разрабатываемый объект не является материальным. В работе проведён анализ негативного воздействия на литосферу, возникающего при утилизации неисправного оборудования (сломанные средства измерения и электрические приборы, лампы и т.д.), а также проведен анализ потребления электроэнергии.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	Существует вероятность возникновения техногенных ЧС, особенно пожаров.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	Рабочее место при выполнении работ в положении сидя должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032. Условия труда регламентируются трудовым кодексом РФ.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2018
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Авдеева Ирина Ивановна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ61	Власова Мария Владимировна		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 107 с., 11 рис., 39 табл., 31 источник, 2 прил.

Ключевые слова: градуировочная характеристика СИ, компенсация систематической погрешности, метод наименьших квадратов.

Объектом исследования является процедура градуировки средства измерений, обеспечивающая уменьшение его систематической погрешности.

Цель магистерской диссертации – провести экспериментальные исследования обработки результатов неравнодисперсных измерений, полученных набором из пяти цифровых мультиметров, с целью построения их градуировочных характеристик.

В процессе работы проведен обзор методов построения градуировочных характеристик СИ на основе регрессионного анализа, произведено оценивание точности методики выполнения измерений с учетом влияющих факторов. Была также проведена оценка воспроизводимости результатов измерений разными экземплярами СИ одного типа и построены их градуировочные характеристики по экспериментальным данным.

В результате работы была подтверждена целесообразность градуировки СИ в целях уменьшения систематической погрешности.

Степень внедрения: результаты работы используются при организации процесса калибровки цифровых мультиметров, проводимого в калибровочной лаборатории АО НПФ «Микран».

Область применения: стандартизация и метрология, измерительная техника, электроника, управление качеством.

Экономическая эффективность/значимость работы: градуировка СИ увеличивает точность измерений, что позволяет использовать менее точные СИ, тем самым, сокращая затраты на более дорогое оборудование.

Оглавление

	С.
Введение	13
1 Особенности метода индивидуальной градуировки средств измерений	14
1.1 Способы повышения точности измерений	14
1.2 Градуировочные характеристики средств измерений	17
1.2.1 Задача построения градуировочных характеристик средств измерений	18
1.2.2 Порядок построения градуировочной характеристики	19
1.2.3 Методы построения градуировочной характеристики	20
1.2.4 Регрессионный анализ. Метод наименьших квадратов	22
1.3 Объединение результатов измерений	24
1.3.1 Наилучшая оценка множества измерений	24
1.3.2 Среднее (взвешенное) значений	26
2 Оценивание показателей точности методик и результатов измерений	30
2.1 Оценивание точности методики (выполнения) измерений	30
2.2 Внутрिलाбораторные факторы	36
2.3 Методика оценки воспроизводимости	37
2.4 Внутрिलाбораторное исследование по оценке промежуточной прецизионности	38
3 Построение линейных градуировочных характеристик методом наименьших квадратов	46
3.1 Введение поправки в результат измерения	47
3.2 Расчет СКО результата измерения и СКО поправки	48
3.3 Оценка воспроизводимости результатов измерений разными экземплярами средств измерений	50
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	54
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования	54

4.2	Анализ конкурентных технических решений	55
4.3	SWOT-анализ	57
4.4	Структура работ в рамках научного исследования	60
4.5	Определение трудоемкости выполнения работ	61
4.6	Составление графика проведения научного исследования	61
4.7	Определение бюджета научно-технического исследования	63
4.7.1	Расчет материальных затрат научно-технического исследования	64
4.7.2	Расчет основной заработной платы исполнителей темы	65
4.7.3	Расчет дополнительной заработной платы исполнителей темы	67
4.7.4	Расчет отчислений во внебюджетные фонды	67
4.7.5	Расчет накладных расходов	68
4.7.6	Формирование бюджета затрат научно-технического исследования	69
4.8	Определение социальной эффективности исследования	69
5	Социальная ответственность	71
5.1	Производственная безопасность	71
5.1.1	Отклонение показателей микроклимата	72
5.1.2	Недостаточная освещённость рабочей зоны	73
5.1.3	Повышенный уровень электромагнитных излучений	75
5.1.4	Повышенный уровень шума на рабочем месте	76
5.1.5	Длительность сосредоточенного наблюдения	76
5.1.6	Электробезопасность	78
5.2	Экологическая безопасность	79
5.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	80
5.4	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	82
5.4.1	Эргономические требования к рабочему месту	82
5.4.2	Особенности законодательного регулирования проектных решений	83

5.5 Вывод по разделу социальная ответственность	85
Заключение	86
Список использованных источников	87
Приложение А (обязательное). Результаты вычислений коэффициентов регрессии для исследуемых экземпляров мультиметров	90
Приложение Б (обязательное). Раздел, выполненный на иностранном языке	95

Введение

Повышение требований к качеству продукции и эффективности производства, вследствие развития науки и техники, повлекли за собой конструктивные изменения требований к измерениям. Один из основных аспектов этих требований – предоставление достаточно достоверной оценки погрешности измерений. Недостаток сведений о точности измерений или малодостоверные ее оценки полностью или в большей степени обесценивают информацию о качестве продукции, свойствах и характеристиках объектов, об эффективности технологических процессов и т.п., полученную в результатах измерений.

Недостоверная оценка погрешности результата измерений влечет за собой технические неисправности, а иногда вызывает финансовые потери. Стремление свести погрешность к минимуму – одно из характерных направлений развития практической метрологии. Эта направленность играет наибольшую роль там, где требуемая точность измерений приближается к точности, которую могут обеспечить эталоны.

Целью работы является подход к обработке экспериментальных данных, полученных для СИ одного типа, позволяющий построить градуировочную характеристику СИ с минимизированной составляющей систематической погрешности.

В первом разделе рассмотрены способы повышения точности измерений, а именно метод построения градуировочной характеристики.

Во втором разделе проведена оценка точности методики выполнения измерений, путем расчета промежуточной прецизионности.

Третий раздел содержит экспериментальные исследования внесения поправки в показания пяти экземпляров мультиметров. Результаты экспериментальных исследований были обработаны методом регрессионного анализа для определения параметров градуировочных характеристик.

1 Особенности метода индивидуальной градуировки средств измерений

1.1 Способы повышения точности измерений

Повышение точности измерений является одним из основных путей к повышению качества продукции и эффективности производства. Проблему повышения точности измерений решают последующим алгоритмом.

На первом этапе исследуют измерительную задачу и те цели, для которых применяют РИ, а также всю совокупность условий, влияющих на точность измерений. Этот анализ проводят для применяемой методики выполнения измерений, точность которой признана недостоверной из-за возможных существенных неблагоприятных последствий, обусловленных погрешностью измерений.

Способ повышения точности измерений определяют только после выявления доминирующих составляющих погрешности и оценивания отдельных составляющих погрешности измерений. При этом учитываются не только методические, но и инструментальные, и субъективные составляющие погрешности измерений, и кроме того, систематический и случайный характер всех составляющих погрешности измерений [1].

Основными методами повышения точности результатов измерений являются следующие методы:

- а) замена менее точного средства измерений на более точное (приобретение или разработка специальных СИ);
- б) ограничение условий применения СИ;
- в) индивидуальная градуировка СИ;
- г) выполнение многократных наблюдений с дальнейшим усреднением их результатов;
- д) автоматизация измерительных процедур;
- е) совершенствование старых или разработка новых методик измерений.

Метод замены менее точного СИ на более точное, дает более значимый результат при доминирующих инструментальных составляющих погрешности измерений.

Этот метод доступен не во всех вариантах. Возможности выбора более точных СИ зачастую ограничены. Как правило, подобные ограничения связаны с условиями, в которых эксплуатируются СИ. Кроме того, принимают в расчет то, что повышение точности измерений подразумевает повышение стоимости данных СИ.

Метод ограничения условий применения СИ имеет значение, когда доминируют дополнительные погрешности СИ, которые обусловлены значительными отклонениями действительных значений внешних влияющих факторов от нормальных значений. Для большого количества СИ обнаружены существенные составляющие погрешности при довольно больших отклонениях действительных значений от нормальных значений воздействующих вибраций, температуры окружающей среды, параметров питания или иных влияющих величин, проявляющиеся в условиях испытаний.

В аналогичных случаях принимают надлежащие мероприятия по снижению влияния на погрешность измерений существенных внешних воздействующих величин (установка стабилизаторов напряжения питающей сети, специальных экранов с целью защиты от влияния электромагнитных полей, кондиционеров в помещении, амортизаторов с целью снижения вибрационных воздействий и др.)

Метод индивидуальной градуировки СИ эффективен, если доминируют систематические составляющие погрешности СИ. К примеру, систематическая составляющая погрешности для термометров сопротивления и термопар при узком диапазоне измеряемых температур преобладает и остается практически постоянной в течение длительного периода (нескольких месяцев). Данная погрешность может быть существенно снижена путем введения поправок в РИ, полученных при индивидуальной градуировке.

Метод выполнения многократных наблюдений с дальнейшим усреднением их результатов эффективен при доминировании случайной составляющей погрешности измерений.

Установлено, что случайная составляющая погрешности РИ среднего значения меньше случайной составляющей погрешности РИ текущих значений. С целью повышения точности измерений текущих значений необходимо, чтобы усреднение не приводило к существенному сглаживанию информации о процессе изменения измеряемой величины. Использование данного метода возможно в случае, если в течение промежутка времени усреднения не происходит ощутимого изменения текущих значений измеряемой величины и в то же время, в течение этого периода времени, значительно изменяется погрешность измерений текущих значений.

Метод автоматизации измерительных процедур кроме снижения трудоемкости измерений способствует исключению субъективных составляющих погрешностей, появляющихся при вычислении промежуточных и конечных результатов измерений, приготовлении проб для анализов, обработке диаграмм, и других операциях, выполняемых человеком.

При доминировании методических составляющих погрешности измерений, то метод совершенствование методик выполнения измерений или разработки новых МВИ является единственно эффективным.

Если преобладает методическая составляющая погрешности измерений средних или интегральных значений, обусловленная отклонениями действительных значений от номинальных значений неизмеряемых величин или ограниченным числом «точек» измерений, входящих в функцию в виде констант, соответствующее совершенствование МВИ дает значимый результат в повышении точности измерений. МВИ могут быть усовершенствованы преобразованием алгоритма обработки РИ [2].

1.2 Градуировочные характеристики средств измерений

Под градуировочной характеристикой средства измерений (измерительного преобразователя или прибора) понимается функциональная зависимость между входной (X) и выходной (Y) величинами, построенная на основе результатов измерений входных и соответствующих выходных величин в m точках диапазона $(x_i, y_i), i = 1, \dots, m$.

$$Y = f(X). \quad (1)$$

Градуировочная характеристика может быть отображена в виде:

- формулы;
- таблицы;
- графика (построенным без сглаживания или со сглаживанием).

Различаются индивидуальные ГХ, построенные на конкретных экземплярах СИ, и типовые ГХ, построенные для группы однотипных СИ.

Погрешность ГХ $Y = f(X)$ в точке X определяется как разность между значением ГХ в точке X и истинным значением величины Y в точке X .

$$\Delta(X) = f(X) - Y \quad (2)$$

Могут оцениваться следующие характеристики погрешностей:

- $\Delta(X)$ – границы (суммарной) погрешности ГХ в точке X ;
- Δ – границы погрешности ГХ по всему диапазону изменения X ;
- $S(X)$ и $\theta(X)$ – СКО случайной и границы систематической составляющих погрешности ГХ в точке X ;
- $\varepsilon(X)$ и $\theta(X)$ – границы случайной и систематической составляющих погрешности ГХ в точке X .

При задании доверительных границ случайной погрешности $\varepsilon(X)$, а также границ $\Delta(X)$ и $\theta(X)$, если они получены статистическими методами, необходимо указывать доверительную вероятность P . Обычно при массовых измерениях (если не оговаривается противное) рекомендуется принимать $P = 0,95$. При измерениях высшей точности рекомендуется использовать $P = 0,99$ [3].

1.2.1 Задача построения градуировочных характеристик средств измерений

В связи с повышением требований к точности измерений возрастает число средств измерений, для которых выполняется индивидуальная градуировка. В деятельности метрологических лабораторий цель передачи размеров единиц величин от эталонов рабочим СИ является наиболее востребованной и важной. При передаче размеров единиц наибольшее распространение приобретает метод градуировки, при котором не только осуществляют контроль на соответствие погрешностей поверяемого средства измерения установленным нормам, а устанавливают значения поверяемых мер, вводят поправки в показания приборов или строят ГХ СИ. Данный способ предоставляет наименьшую потерю точности при передаче размеров единиц, и во многих случаях единственно возможный.

Цель построения ГХ СИ – важный частный случай общей задачи прикладной метрологии – построения функциональных зависимостей по экспериментальным данным.

Зачастую, вопросы оценивания погрешностей построенных зависимостей опускаются и анализируются лишь методы оценивания случайных погрешностей, в то время как оценивание систематических погрешностей отсутствует.

Одно из основных условий повышения точности, это соблюдение нормальных условий испытаний. Однако порой, приходится проводить измерения в непроизводственных условиях, которые в различной степени могут отличаться от нормальных условий.

С целью рассмотрения влияния условий испытаний на показания СИ, будет взят достаточно распространенный источник дополнительной погрешности – температура. Необходимо создать условия при помощи камеры тепла, холода и влаги для оценки влияния погрешности от температуры [4].

1.2.2 Порядок построения градуировочной характеристики

При построении ГХ в общем случае рекомендуется придерживаться следующей последовательности операций:

- получение исходных экспериментальных данных (x_i, y_i) , $i=1, \dots, m$.
- выбор способа представления и функционального вида ГХ;
- выбор метода построения ГХ;
- оценивание параметров ГХ и построение искомой ГХ;
- оценивание погрешностей ГХ;
- проверка адекватности построенной ГХ экспериментальным данным.

Исходные данные для построения индивидуальных ГХ (X_i, Y_i) , $i = 1, \dots, m$, могут быть получены в ходе прямых или косвенных измерений.

В ходе выполнении измерений входных и выходных величин имеют место случаи непланируемого или планируемого эксперимента. В случае непланируемого эксперимента значения входных величин x_i определяются условиями эксперимента и не могут быть выбраны исследователем. С целью получения результатов эксперимента, в данном случае, последовательно измеряют каждую входную величину X_i и соответствующую ей выходную величину Y_i , $i = 1, \dots, m$. В случае планируемого эксперимента исследователь сам выбирает значения входных величин X_i , $i = 1, \dots, m$, при которых будет выполняться эксперимент, и число наблюдений n_i в каждой калибровочной точке. Далее, последовательно воспроизводят выбранные значения входных величин X_i , $i = 1, \dots, m$ и измеряют соответствующие им выходные величины Y_i (выполняют n_i наблюдений).

В соответствии с постановкой задачи построения ГХ будет рассматриваться случай однофакторного эксперимента.

Выбор способа представления ГХ (графический, табличный или аналитический) обуславливается:

- требуемой точностью построения градуировочной характеристики;
- возможностью аппроксимации ГХ функцией простого аналитического

вида;

- методом применения построенной ГХ.

Алгоритм построения ГХ зависит от способа ее представления. При отображении градуировочной характеристики в виде таблицы представляют полученные результаты измерений в виде таблицы (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, m$. При построении ГХ в виде графика (без сглаживания) наносят полученные точки (x_i, y_i) на график и соединяют точки отрезками прямой. В случае аналитического представления ГХ выбор ее функционального вида выполняют на основе:

- сведений о требуемом или возможном функциональном виде ГХ;
- физических соотношений, описывающих свойства СИ или явления, лежащие в основе их действия;
- результатов предыдущих исследований подобных СИ;
- результатов предварительного анализа полученных экспериментальных данных;
- требований к точности построения ГХ.

Функциональный вид ГХ следует выбирать по возможности простым, с небольшим числом параметров. Наиболее удобными являются ГХ, в которые параметры входят линейно. При необходимости возможно разбиение диапазона на отдельные интервалы и построение ГХ различных видов на интервалах [5].

1.2.3 Методы построения градуировочной характеристики

При аналитическом представлении ГХ наиболее важными для практики являются 3 группы функциональных зависимостей:

- линейные;
- нелинейные ГХ вида $U(Y) = a + bV(X)$;
- приводимые к линейным путем замены переменных:

$$Y' = a + bX', X' = V(X), Y' = U(Y) \quad (3)$$

– нелинейные ГХ, являющиеся линейными комбинациями известных функций:

$$Y = \sum a_j g_j(X), \quad (4)$$

где g_j – известные функции;

a_j – определяемые коэффициенты.

Линейные ГХ в конкретных случаях могут быть представлены в виде:

– $Y = a + bX$ – линейная ГХ общего вида;

– $Y = a + b(X - \bar{X})$ – линейная ГХ, приведенная к средней точке \bar{X} ;

– $Y = bX$ – линейная ГХ, проходящая через начало координат.

Методы построения ГХ производится на основе следующих априорных данных:

– о функциональном виде ГХ;

– о виде распределения случайных погрешностей измерений величин X_i, Y_i , в частности, гауссовский или отличный от него;

– о характеристиках погрешностей измерений X_i, Y_i , в частности, характеристики могут быть заданы априори или оценены по экспериментальным данным; постоянны или переменны по диапазону значений X_i, Y_i , причем веса могут быть заданы априори или оценены;

– о значениях входных величин X_i , в частности:

а) X_i известны точно (или погрешности X_i пренебрежимо малы по сравнению с погрешностями Y_i);

б) X_i известны с погрешностями, но имеется дополнительная информация об их дисперсиях.

Если ГХ имеет линейный или полиномиальный вид и значения X_i известны точно, то для построения ГХ используют:

– в случае гауссовских распределений погрешностей измерений Y_i – метод наименьших квадратов (МНК);

– в случае отличных от гауссовских распределений погрешностей измерений Y_i – робастные методы (усеченный МНК или М-оценки Хубера).

Основные методы построения линейных ГХ, приведены в таблице 1 [6].

Таблица 1 – Методы построения линейных ГХ

№ метода	Априорная информация			Методы построения ГХ
	распределения погрешностей	дисперсии погрешностей	значения аргументов X_i	
1	Гауссовские	Постоянны	Точные	МНК
2		Известны веса		МНК с весами
3		Постоянны	Планируемые	МНК с учетом приведенных погрешностей
4	Близки к гауссовским			Известны веса
5		Усеченный МНК с весами		
6		М-оценки Хубера		
7	Гауссовские	Известны σ_x^2 или σ_y^2	Содержат погрешности	Модифицированный МНК
8		Известны $\lambda = \sigma_x^2 / \sigma_y^2$		Метод ортогональной регрессии
9	Произвольны	Постоянны	Известен порядок X_i	Дробно-линейные оценки
10			Равномерны по диапазону	Оценка Хаузнера-Бреннана
11			Разбиты на 2 или 3 группы	Оценки Вальда или Бартлетта

1.2.4 Регрессионный анализ. Метод наименьших квадратов

Экспериментальное исследование зависимости величин и поведение исследуемых систем и соединений, представляется крайне значимой проблемой в сфере точных измерений. Эта задача позволяет решать многие проблемы такие как:

- сжатие (объединение результатов), когда подобранная функция используется для описания (аппроксимации) большого массива экспериментальных данных;
- построение калибровочных зависимостей, согласно которым можно прогнозировать значения условий, которые гарантируют конкретный результат;
- задача оптимизации – аппроксимация экспериментальных данных функцией с целью поиска точек минимума (максимума) .

Одним из часто используемых алгоритмов регрессионного анализа является метод наименьших квадратов (МНК). Суть метода заключается в минимизации расстояния между фактическим значением измеряемой величины и восстановленным значением этой же величины. Разности между фактическими значениями величины и восстановленным называются регрессионными остатками (невязками, ошибками). Одной из важных оценок критерия качества полученной зависимости является сумма квадратов остатков. Данный метод используют для построения линейной зависимости при гауссовских распределениях погрешностей измерений выходных величин и точно известных значениях входных величин X_i . При этом линейную градуировочную характеристику представляют в виде

$$Y = a_0 + b \cdot (X - \bar{X}), \quad (5)$$

где \bar{X} – среднее (взвешенное) значений X_i .

Относительно выполнения измерений выходных величин Y можно выделить три основных случая:

- равноточные однократные измерения;
- равноточные многократные измерения;
- неравноточные измерения с известными или оцениваемыми весами.

В случае неравноточных измерений при вычислении коэффициентов и оценивании погрешностей ГХ используют веса w_i отдельных результатов измерений y_i , которые определяют, исходя из оценок дисперсий случайных погрешностей выходных величин с учетом сведений о их систематических погрешностях.

Если при неравноточных измерениях:

- систематические погрешности результатов измерений y_i постоянны или пренебрежимо малы;
- известна зависимость дисперсии случайных погрешностей y_i от значений входной величины X_i

$$S_i^2 = S^2 \cdot h(X_i), \quad (6)$$

где $h(X)$ – известная функция, то веса результатов y_i принимают равными

$$w_i = \frac{1}{h(X_i)}. \quad (7)$$

Если систематические погрешности результатов измерений y_i постоянны (пренебрежимо малы) и выполняются многократные наблюдения в точке X_i , то для среднего значения $\bar{y}_i = \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}/n_i$ принимают вес $w_i = n_i/S_i^2$, где $S_i^2 = \sum_{j=1}^{n_i} \frac{y_{ij}-\bar{y}_i)^2}{n_i-1}$ – оценка дисперсии наблюдений в точке X_i .

Если при неравноточных многократных измерениях в точках X_i исходные составляющие систематических погрешностей y_{iq} изменяются нерегулярным образом, в заданных границах $\pm\theta_{iq}$ и получены оценки y_{iq} в точках X_i , то для средних \bar{y}_i принимают веса

$$w_i = (\frac{S_i^2}{n_i} + \sum_{q=1}^k \theta_{iq}^2/3)^{-1}. \quad (8)$$

В случае неравноточных измерений оценки коэффициентов вычисляют по формулам:

$$a_0 = \bar{Y} = \sum_i^m w_i \bar{y}_i / \sum_i^m w_i, \quad (9)$$

$$b = \sum_i^m w_i \bar{y}_i (X_i - \bar{X})^2 / \sum_i^m w_i (X_i - \bar{X})^2, \quad (10)$$

где $\bar{X} = \sum_i^m w_i X_i / \sum_i^m w_i$, w_i – веса результатов \bar{y}_i [7,8,9].

1.3 Объединение результатов измерений

1.3.1 Наилучшая оценка множества измерений

Часто размер величины измеряется несколько раз, возможно в нескольких отдельных лабораториях и возникает вопрос, как эти измерения могут быть объединены, чтобы дать единственную наилучшую оценку. Предположим, например, что два студента A и B измеряют величину x , одинаково тщательно и получают следующие результаты:

$$\text{Студент } A: x = x_A \pm \sigma_A, \quad (11)$$

$$\text{Студент } B: x = x_B \pm \sigma_B, \quad (12)$$

Каждый результат будет сам по себе результатом нескольких измерений. Так как речь идет о градуировочной характеристики, измерения должны проводиться в нескольких калибровочных точках, которые должны проводиться с некоторым повтором. Так как эти повторы не сильно разнятся между собой и не влекут за собой большую погрешность, то допустимо проведение этих измерений менее 15. Если очень велика случайная составляющая, тогда есть смысл проводить большое количество повторных измерений в одной точке. В большинстве цифровых приборах случайная составляющая мала и не выявляется. Поэтому в дальнейших измерениях, когда мы будем рассматривать результат измерения одной калибровочной точки, то считаем, что она среднее арифметическое трех повторных измерений.

Вопрос состоит в том, как наилучшим образом сочетать два измерения, выполненные разными операторами x_A и x_B , для того, чтобы найти наилучшую оценку x . Если разность $|x_A - x_B|$ между двумя измерениями значительно больше, чем их дисперсии (неопределенности) σ_A и σ_B , то мы должны убедиться в правильности проведенных измерений. То есть имеет место некая фундаментальная ошибка. В данной ситуации делаем вывод, что эти два измерения несовместимы между собой и мы должны внимательно перепроверить оба измерения так, чтобы увидеть что в одном или обоих измерениях не были допущены систематические погрешности.

Предположим, что эти два измерения (11) и (12) совместимы, то есть разность $|x_A - x_B|$, незначительно больше чем дисперсии σ_A и σ_B . Тогда, мы можем задать вопрос, какая оценка является лучшей оценкой x_{best} для истинного значения X , основанного на двух измерениях. Первое предположение – это использовать среднее арифметическое двух измерений $(x_A + x_B)/2$. Так как две неопределенности σ_A и σ_B не равны, то это предположение не верно. Среднее арифметическое $(x_A + x_B)/2$ делает измерения равноценными, в то время как более точному показанию должен быть придан больший вес.

В данной работе необходимо использовать не просто среднее арифметическое значение, а среднее (взвешенное) значение результатов измерений, так как дисперсия у каждого экземпляра СИ будет разная. Возможно, у некоторых экземпляров будут равные дисперсии, для этого есть фундаментальная причина – либо они были изготовлены с одинаковой тщательностью, либо выпущены с одной партии. Но если хоть один прибор отличен, считаем что измерения неравно дисперсные и производим обработку измерений по среднему взвешенному значений. Таким способом можно выявлять систематическую погрешность СИ [10].

1.3.2 Среднее (взвешенное) значений

Предположим, что оба измерения распределяются по нормальному закону и обозначают неизвестное истинное значение x на X . Поэтому вероятность получения студентом A его конкретного значения x_A равна

$$Prob_X(x_A) \propto \frac{1}{\sigma_A} e^{-(x_A - X)^2 / 2\sigma_A^2}, \quad (13)$$

и для получения студентом B его наблюдаемого значения x_B

$$Prob_X(x_B) \propto \frac{1}{\sigma_B} e^{-(x_B - X)^2 / 2\sigma_B^2}, \quad (14)$$

Нижний индекс X явно указывает, что эти вероятности зависят от неизвестного фактического значения.

Вероятность того, что студент A найдет значение x_A , а студент B значение x_B является произведением двух вероятностей в формулах (13) и (14). В таком случае, это уравнение будет включать экспоненциальную функцию, показатель которой представляет собой сумму двух показателей в формулах (13) и (14). Преобразуем в формулу (15)

$$Prob_X(x_A, x_B) = Prob_X(x_A) Prob_X(x_B) \propto \frac{1}{\sigma_A \sigma_B} e^{-\chi^2 / 2}, \quad (15)$$

где можно ввести удобное обозначение χ^2 для экспоненты

$$\chi^2 = \left(\frac{x_A - X}{\sigma_A}\right)^2 + \left(\frac{x_B - X}{\sigma_B}\right)^2. \quad (16)$$

Эта величина представляет собой сумму квадратов отклонений от X по двум измерениям, каждая из которых делится на соответствующую им неопределенность.

Принцип максимального правдоподобия утверждает, что полученная лучшая оценка для неизвестного истинного значения X является тем значением, для которого наиболее вероятны фактические наблюдения x_A, x_B . То есть наилучшая оценка для X это значение, для которого вероятность по формуле (15) максимальна или, что эквивалентно, показатель χ^2 – минимален. (Поскольку максимизация вероятности влечет минимизацию «суммы квадратов» χ^2 , этот метод оценки X иногда называют «методом наименьших квадратов»). Таким образом, чтобы найти наилучшую оценку, необходимо продифференцировать формулу (16) по X и приравнять производную к нулю

$$2 \frac{x_A - X}{\sigma_A} + \frac{x_B - X}{\sigma_B} = 0. \quad (17)$$

Решение этого уравнения для X является наилучшей оценкой. Это можно заметить по формуле (18)

$$(\text{наилучшая оценка для } X) = \left(\frac{x_A}{\sigma_A^2} + \frac{x_B}{\sigma_B^2}\right) / \left(\frac{1}{\sigma_A^2} + \frac{1}{\sigma_B^2}\right) \quad (18)$$

Данное уравнение можно преобразовать, если определить веса

$$w_A = \frac{1}{\sigma_A^2} \text{ and } w_B = \frac{1}{\sigma_B^2} \quad (19)$$

Далее возможно переписать формулу (18) как средневзвешенное значение (x_{wav})

$$(\text{наилучшая оценка для } X) = x_{wav} = \frac{w_A x_A + w_B x_B}{w_A + w_B} \quad (20)$$

Если два исходных измерения имеют одинаковые неопределенности ($\sigma_A = \sigma_B$ и, следовательно, $w_A = w_B$), то вычисление сводится к определению простого среднего арифметического $(x_A + x_B)/2$. В общем случае, когда

$w_A \neq w_B$, взвешенное среднее по формуле (20) не совпадает с обычным средним арифметическим; это похоже на формулу для центра тяжести двух тел, где w_A и w_B – фактические веса двух тел, а x_A и x_B – их положения. В формуле (20), «веса» представляют собой обратные квадраты неопределенностей в исходных измерениях, как в формуле (19). Если измерение студента A более точное, чем B то $\sigma_A < \sigma_B$ и следовательно $w_A > w_B$, поэтому наилучшая оценка x_{best} ближе к x_A , чем к x_B , как и должно быть.

Выше описанный анализ можно применить для большого количества измерений. Предположим, что мы имеем N отдельных измерений величины x ,

$$x_1 \pm \sigma_1, x_2 \pm \sigma_2, \dots, x_N \pm \sigma_N, \quad (21)$$

с соответствующими им неопределенностями $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N$. Делаем вывод, что лучшая оценка, основанная на этих измерениях, является средневзвешенной

$$x_{wav} = \frac{\sum w_i x_i}{\sum w_i}, \quad (22)$$

если суммы превышают все N измерений, $i = 1, \dots, N$, а вес w_i каждого измерения является обратным квадратом соответствующей неопределенности,

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (23)$$

для $i = 1, 2, \dots, N$.

Поскольку вес $w_i = 1/\sigma_i^2$ связанный с каждым измерением, включает квадрат соответствующей неопределенности σ_i , любое измерение, которое намного менее точное, чем другие, вносит гораздо больший вклад в окончательный ответ, формула (22). Например, если одно измерение в четыре раза меньше точного, чем другие, его вес в 16 раз меньше других весов, и для многих целей это измерение можно просто проигнорировать.

Поскольку средневзвешенное значение x_{wav} , это функция исходных измеренных значений x_1, x_2, \dots, x_N , неопределенность в x_{wav} может быть

рассчитана с использованием распространения ошибки. Легко проверить, что неопределенность в x_{wav} это

$$\sigma_{wav} = \frac{1}{\sqrt{\sum w_i}}. \quad (24)$$

Этот результат, возможно, переписать как

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{w_i}}. \quad (25)$$

Из переписанного уравнения (25), можно сказать, что неопределенность в каждом измерении является обратным квадратным корнем его веса. Возвращаясь к уравнению (24), мы можем переписать его аналогично, чтобы сказать, что неопределенность в главном ответе x_{wav} является обратным квадратным корнем из суммы всего индивидуального веса, другими словами, общий вес окончательного ответа представляет собой сумму индивидуального веса w_i [11].

2 Оценивание показателей точности методик и результатов измерений

2.1 Оценивание точности методики (выполнения) измерений

С целью описания точности методики измерений используют два термина: «прецизионность» и «правильность». Термин «прецизионность» характеризует уровень близости РИ друг к другу. Термин «правильность», в свою очередь, определяет степень близости среднего арифметического значения множества РИ к принятому опорному или истинному значению (рисунок 1).

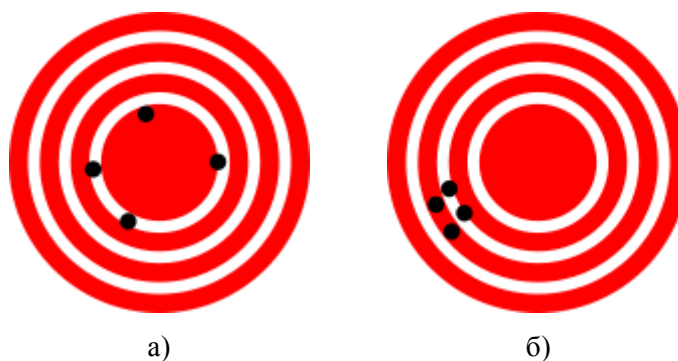


Рисунок 1 – Сравнение терминов «правильность» и «прецизионность»

а) низкая точность, высокая правильность, низкая прецизионность; б) низкая точность, высокая прецизионность, низкая правильность

Потребность в рассмотрении «прецизионности» появляется из-за того, что измерения, выполненные при ориентировочно идентичных обстоятельствах и на ориентировочно идентичных материалах, не дают, идентичных результатов. Это объясняется неминуемыми случайными погрешностями, свойственными каждому измерительному процессу, а факторы, которые оказывают влияние на РИ, не могут поддаваться абсолютному контролю. При практической интерпретации РИ данная изменчивость обязана предусматриваться. К примеру, невозможно определить фактическое отличие между полученным РИ и какой-нибудь точной величиной, если она находится в области неминуемых случайных погрешностей измерительного процесса.

Подобным способом, сравнение результатов испытаний 2-х значительно отличающихся партий материала не выявит какого-либо значимого различия в качестве, если несоответствие между результатами находится в вышесказанной области.

На изменчивость РИ, выполненных по одной МВИ, кроме отличий среди ориентировочно идентичными образцами, могут оказывать влияние многочисленные факторы, такие как:

- а) используемое СИ;
- б) оператор;
- в) калибровка средства измерений;
- г) интервал времени между измерениями;
- д) параметры окружающей среды (температура, влажность, загрязнение воздуха и т.д.).

Отличия между РИ, выполненных с помощью различного оборудования и/или разными операторами, как правило, будут больше, чем между РИ, выполненных одним оператором в течение кратковременного промежутка с использованием того же оборудования.

Прецизионность представляется единым термином для выражения изменчивости повторяющихся измерений. С целью представления изменчивости МВИ различают:

- прецизионность в условиях повторяемости;
- прецизионность в условиях воспроизводимости.

Данные условия признаны необходимыми и, во многочисленных практических вариантах, полезными для понимания изменчивости МВИ. В условиях повторяемости факторы а)-д), приведенные выше, остаются постоянными, и они не оказывают влияние на изменчивость, в то время как в условиях воспроизводимости все данные факторы переменчивы и оказывают влияние на изменчивость РИ. В таком случае, воспроизводимость и повторяемость предполагают 2 крайних случая прецизионности, где первый характеризует максимальную, а второй – минимальную изменчивость

результатов. Другие промежуточные условия среди этих двух экстремальных условий прецизионности возможны, если один или несколько факторов а)-д) будут меняться и применяться при определенных условиях. Прецизионность, зачастую, выражают в терминах стандартных отклонений.

Правильность МВИ имеет смысл, если возможно прямо или косвенно представить истинное значение измеряемой величины. Хотя для некоторых МВИ истинное значение не может быть известно точно, имеется шанс располагать установленным опорным значением измеряемой величины, к примеру, когда:

- принятое опорное значение может быть установлено путем ссылки на другую МВИ;
- имеются в распоряжении соответствующие эталоны;
- путем приготовления известного образца.

При этом правильность той или другой МВИ может быть исследована с помощью сравнения принятого опорного значения с уровнем результатов, полученных данным способом. Правильность, зачастую, выражают в терминах систематической погрешности (смещение).

Общий термин «точность» применяют в отношении двух терминов – «правильность» и «прецизионность». Ранее, термин «точность» применялся, распространяясь только на одну составляющую – «правильность», тем не менее было доказано, что «точность» выражает суммарное отклонение РИ от эталонного (опорного) значения, вызванное как случайными, так и систематическими составляющими погрешности.

На рисунке 2 представлена взаимосвязь между понятиями прецизионности, правильности, точности и неопределенности.

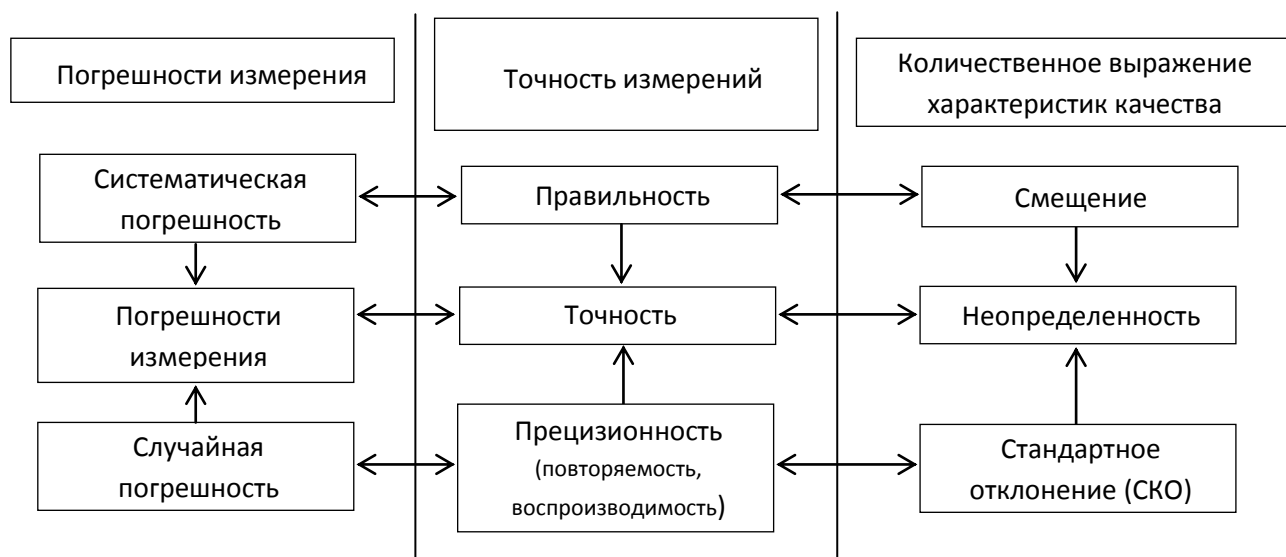


Рисунок 2 – Взаимосвязь между понятиями прецизионности, правильности, точности и неопределенности

Далее, в работе особое внимание уделяется промежуточным показателям прецизионности МВИ. Показатели называют промежуточными, потому что их численные значения находятся между 2-мя экстремальными показателями прецизионности – значениями стандартных отклонений воспроизводимости и повторяемости.

Работа современной лаборатории нуждается в вычислении промежуточных показателей прецизионности, так как производственные предприятия, зачастую, имеют посменный режим работы, где измерения могут проводиться разными операторами на различном оборудовании. В данном случае операторы и оборудование – это факторы, которые способствуют изменчивости РИ, и их необходимо обязательно учитывать при оценке прецизионности МВИ.

Факторы, оказывающие влияние на прецизионность методики измерений:

- оператор (снятие показаний может производиться одним или несколькими операторами);
- калибровка (оборудование между группами измерений может подвергаться перекалибровке);

- время (короткий или длительный интервал времени между измерениями);
- оборудование (использование одного и того же или различного оборудования);
- температура (условия проведения испытаний могут быть как одинаковыми, так и различными, в течение снятий показаний).

Для того, чтобы учесть все изменения условий выполнения измерений (калибровка, время, оператор и тд.) в пределах одной лаборатории, целесообразно ввести следующие промежуточные условия прецизионности с количеством изменяющихся факторов M .

Разные промежуточные условия прецизионности являются причиной разных значений стандартных отклонений прецизионности (промежуточных стандартных отклонений), обозначаемых S_{IQ} , где в скобках приведены определенные условия. К примеру, $S_{I(OT)}$ предполагает стандартное отклонение промежуточной прецизионности при выполнении измерений разными операторами (O) и в разные промежутки времени (T).

Промежуточные условия прецизионности учитываются, когда изменяется более одного фактора. В условиях повторяемости представляем, что эти факторы являются постоянными.

Результаты, полученные в промежуточных условиях прецизионности, как правило, больше, чем в случае стандартного отклонения РИ, полученного в условиях повторяемости. Безусловно, это стандартное отклонение не должно выходить за пределы стандартного отклонения воспроизводимости.

Данная методика выполнения измерений применяется только к методам измерений непрерывных величин, представляющим в качестве РИ единственное значение. Это единственное значение может являться и результатом расчета, который основан на ряде измерений одной и той же величины.

Смысл вычисления промежуточных показателей прецизионности заключается в том, чтобы на их основе оценить способность МВИ к повторению РИ в точно заданных условиях.

Статистические методы, основываются на объединении информации по «подобным» условиям выполнения измерений для получения надежной и более точной информации по промежуточным показателям прецизионности. Это объединение справедливо при условии, что объявленное «подобным» на самом деле является таковым. Однако довольно сложно придерживаться данной предпосылки при оценке промежуточных показателей прецизионности на основе межлабораторного исследования. При этом, бывает трудно определить, являются ли «подобными» для разных лабораторий факторы «оператор» или «время», так чтобы группируемая информация от лаборатории имела смысл. Таким образом, использование результатов межлабораторного эксперимента для оценки промежуточных показателей прецизионности требует повышенного внимания. ВнутрILAбораторные эксперименты также опираются на эту предпосылку, однако обычно она бывает достаточно реалистичной, т.к. контроль и знание непосредственного влияния фактора в данном случае в большей степени находятся в пределах досягаемости аналитика.

Для подтверждения и оценивания промежуточных показателей прецизионности в пределах одной лаборатории, существуют множество методов, например метод контрольных карт. В данной работе будет использоваться альтернативный метод, так как он включает в себя группу измерений с n повторными результатами.

Для того, чтобы измерения выполнялись по одной и той же процедуре, метод измерений должен быть стандартизован. Все измерения, составляющие внутрILAбораторный или межлабораторный эксперимент, должны выполняться в соответствии с таким стандартом [12].

2.2 Внутрिलाбораторные факторы

Факторами, влияющие на изменчивость получаемых результатов могут быть: калибровка оборудования, оператор, интервал времени между измерениями, параметры окружающей среды, и тд. В условиях повторяемости наблюдения показаний проводятся при неизменности всех внутрिलाбораторных факторов. В условиях воспроизводимости данные факторы наоборот изменчивы. При определенных обстоятельствах бывает полезно рассмотреть промежуточные условия прецизионности, при которых наблюдения производятся в одной и той же лаборатории, но при этом несколько факторов, таких как «оператор», «условия окружающей среды» или «оборудование» могут изменяться. В следствии установлении прецизионности МВИ важно точно определить соответствующие условия испытаний, то есть должны ли быть три вышеупомянутых фактора постоянными или нет. В таблице 2 приведены возможные факторы и их состояния

Таблица 2 – Факторы и их состояния

Фактор	Условия выполнения измерений в пределах лаборатории	
	Состояние 1 (одинаковые)	Состояние 2 (различные)
Время	Измерения, выполняемые в одно и то же время	Измерения, выполняемые в разное время
Калибровка	Отсутствие калибровки между измерениями	Калибровка выполняется между измерениями
Оператор	Один и тот же оператор	Разные операторы
Оборудование	Одно и то же оборудование без перекалибровки	Разное оборудование
Параметры окружающей среды	Одинаковые условия окружающей среды лаборатории	Разные условия

Под фразой «измерения, выполняемые в одно и то же время» предполагают измерения, которые проводят за максимально короткий период времени для того, чтобы свести к минимуму изменения в условиях выполнения измерений, таких как условия окружающей среды, постоянство которых нельзя всегда гарантировать. Под фразой «измерения, выполняемые в разное время» предполагают измерения, выполняемые в течение длительных промежутков

времени, которые могут быть подвержены влияниям изменений окружающей среды.

Термин «калибровка» не означает в данном контексте какой-либо калибровки, которая является обязательной частью процедуры получения РИ при реализации данной методики измерений. Он относится к процессу калибровки, выполняемому в лаборатории периодически, через определенные промежутки времени между выполнением групп измерений.

В некоторых процессах термин «оператор» может означать в действительности группу операторов, которые выполняют какую-либо определенную часть процесса. В данном случае группа рассматривается как один оператор, и любое изменение в распределении обязанностей внутри группы или в составе должно рассматриваться как фактор смены оператора.

Термин «оборудование» означает комплексы оборудования, и любое изменение в каком бы то ни было существенном составляющем компоненте комплекса должно рассматриваться как фактор "различное оборудование".

Термин «параметры окружающей среды» представляет собой совокупность таких условий, как температура и влажность, определяемая в конкретном замкнутом пространстве (лаборатории) [12].

2.3 Методика оценки воспроизводимости

Ниже описанная методика распространяется на измерения непрерывных (в смысле принимаемых значений в измеряемом диапазоне) величин, дающие в качестве РИ единственное значение. При этом единственное значение может быть и результатом расчета, который основан на ряде измерений одной и той же величины.

Альтернативный метод включает в себя t групп измерений, каждая из которых подразумевает n повторных РИ. К примеру, в одной лаборатории проводят эксперимент над t материалами, впоследствии меняя факторы промежуточной прецизионности и t материалов подвергают испытаниям

повторно, при этом процедуру повторяют до тех пор, пока не будет иметься в наличии n результатов измерений по каждому из t материалов. Каждая группа из n результатов измерений должна быть получена на одном идентичном образце или пробе (или на комплекте ориентировочно идентичных образцов или проб в случае испытаний с разрушением образцов), однако при этом не требуется, чтобы материалы были одинаковыми. Следует учесть, чтобы все t материалов находились в таких границах уровней испытаний (значений исследуемого параметра), в пределах которой возможно использовать одно значение стандартного отклонения промежуточной прецизионности при M изменяющихся факторах. Рекомендовано, чтобы значение $t(n - 1)$ было не менее 15.

Для идентификации потенциальных выбросов необходимо построить график $y_{jk} - \bar{y}_j$ в функции номера материала j , где y_{jk} предполагает k -й РИ, а \bar{y}_j – среднее значение n результатов по j -му материалу. Наиболее формальная проверка выбросов заключается в использовании критерия Граббса как для каждой группы в отдельности, так и для всех tn результатов измерений в совокупности [12].

Оценивание стандартного отклонения промежуточной прецизионности при M изменяющихся факторах $S_{I()}$ в таком случае находится по формуле:

$$S_{I()} = \sqrt{\frac{1}{t(n-1)} \sum_{j=1}^t \sum_{k=1}^n (y_{jk} - \bar{y}_j)^2} \quad (26)$$

2.4 Внутрिलाбораторное исследование по оценке промежуточной прецизионности

Исследование по оценке стандартного отклонения промежуточной прецизионности проходило в испытательной лаборатории АО «НПФ «Микран». Были отобраны пять образцов цифровых мультиметров МУ – 64 фирмы Mastech. Необходимо было выполнить восемь групп измерений

постоянного напряжения для девяти калибровочных точек, находящихся в двух пределах измерения – 2 В и 20 В. Количество измерений каждой калибровочной точки равно трем. Факторами промежуточной прецизионности являются «температура» и «влажность» в совокупности, так как влияние на образец происходит одновременно. Условия испытаний воспроизводятся с использованием камеры тепла, холода и влаги ARS 1100 (далее – камера).

Анализ может быть полезен для исследования промежуточной прецизионности с различием по фактору «температура» и «влажность» путем выполнения последовательных измерений на одном и том же образце последовательно с выдержкой заданной температуры и влажности в камере для исследования влияния факторов между измерениями.

Схема эксперимента приведена на рисунке 3. Метрологические характеристики средств измерений, а также характеристики испытательного оборудования, приведены в таблице 3. [13,14,15]

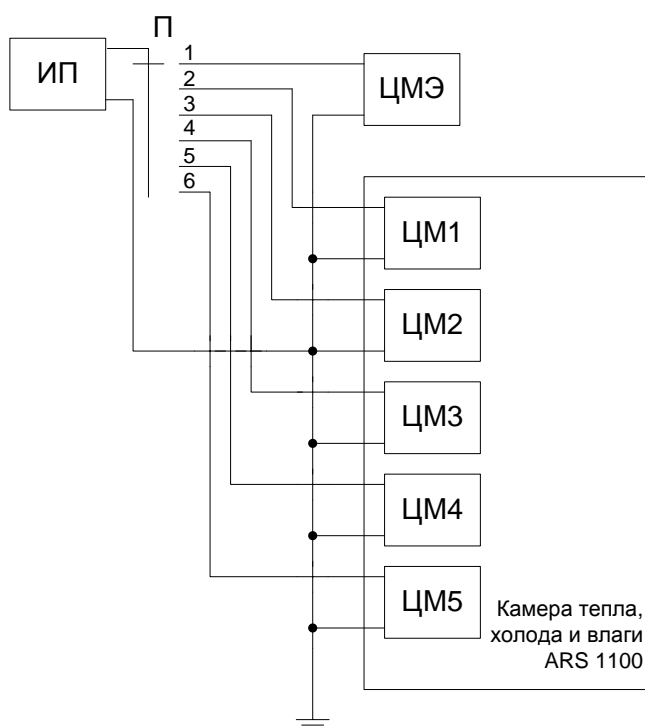


Рисунок 3 – Схема эксперимента

где ИП – источник питания Matrix MPS – 3003LK-2; ЦМЭ – мультиметр цифровой APPA-305; ЦМ1, ЦМ2, ЦМ3, ЦМ4, ЦМ5 – мультиметры цифровые Mastech MY-64; П – переключатель

Таблица 3 – Технические характеристики средств измерений и испытательного оборудования

Средства измерений и испытательное оборудование	Метрологические характеристики средств измерений, характеристики испытательного оборудования
Источник питания Matrix MPS – 3003LK-2	Диапазон воспроизведений напряжения постоянного тока $U_{изм}^*$ (0,1–30) В, диапазон воспроизведений силы постоянного тока $I_{изм}$ (0,01–3) А,
Мультиметр цифровой APPA–305	Диапазоны измерений напряжения постоянного тока $U_{изм}$ (0,0001– 4) В, (0,001–40) В, пределы допускаемой абсолютной погрешности $\pm (0,06 \% U_{изм} + 2 \text{ емр}^{**})$
Мультиметр цифровой Mastech MY-64	Диапазоны измерений напряжения постоянного тока $U_{изм}$ (0,001– 2) В, (0,01–20) В, пределы допускаемой абсолютной погрешности $\pm (0,5 \% U_{изм} + 1 \text{ емр})$. Диапазон рабочих температур от 0 °С до 40 °С, относительная влажность не более 80 %
Камера тепла, холода и влаги ARS-1100	Диапазон воспроизводимых температур от минус 75 °С до +180 °С, относительная влажность от 10 % до 98 %, * Измеренное значение ** Значение единицы младшего разряда

Рабочие мультиметры были помещены в камеру для исследования влияния заданных условий испытаний на показания средств измерений и их погрешности. На камере были установлены значения температуры/влажности, в соответствие с таблицей 4.

Таблица 4 – Установленные значения температуры/влажности на камере

Значения температуры, t , °С	Значения относительной влажности, φ , %
10	60
	80
20	50
	70
30	40
	60
40	20
	60

На вход эталонного и рабочих мультиметров были поданы выходные напряжения с ИП, при этом были установлены соответствующие им пределы измерения, в соответствие с таблицей 5.

Таблица 5 – Выходные напряжения ИП и соответствующие им пределы измерений эталонного и рабочих мультиметров

Выходное напряжение ИП, В	Предел измерений постоянного напряжения ЦМЭ, В	Предел измерений постоянного напряжения ЦМ1-ЦМ5, В
0,6	4	2
1,0		
1,6		
1,98		
2,0	40	20
6,0		
10,0		
16,0		
19,8		

Результаты измерений постоянного напряжения приведены в таблицах 6 – 9.

Таблица 6 – Результаты измерений напряжения при значениях температуры окружающей среды 10 °С

$\varphi, \%$	$x, В$	$y_1, В$	$y_2, В$	$y_3, В$	$y_4, В$	$y_5, В$	$\varphi, \%$	$x, В$	$y_1, В$	$y_2, В$	$y_3, В$	$y_4, В$	$y_5, В$
60	0,6	0,601	0,597	0,601	0,602	0,598	80	0,6	0,602	0,599	0,602	0,602	0,599
		0,602	0,600	0,602	0,602	0,599			0,604	0,605	0,614	0,617	0,614
		0,599	0,598	0,600	0,600	0,597			0,602	0,600	0,602	0,602	0,599
	1	1,002	0,998	1,003	1,001	0,996		1	1,002	0,997	1,002	1,002	0,997
		1,003	0,998	1,003	1,003	0,998			1,002	0,998	1,002	1,003	0,997
		0,994	0,998	1,002	1,003	0,998			1,002	0,998	1,002	1,002	0,996
	1,6	1,601	1,594	1,601	1,602	1,594		1,6	1,604	1,597	1,605	1,605	1,596
		1,603	1,597	1,604	1,605	1,597			1,603	1,596	1,603	1,603	1,595
		1,603	1,597	1,603	1,604	1,596			1,603	1,596	1,603	1,603	1,595
	1,98	1,984	1,976	1,984	1,985	1,975		1,98	1,984	1,975	1,984	1,984	1,975
		1,984	1,976	1,985	1,986	1,976			1,984	1,975	1,984	1,984	1,974
		1,985	1,976	1,985	1,986	1,976			1,984	1,975	1,984	1,984	1,974
	2	2,00	1,98	2,00	2,00	1,99		2	2,00	1,99	2,01	2,00	1,99
		2,00	1,99	2,00	2,00	1,99			2,00	2,00	2,01	2,01	2,00
		1,99	1,99	2,00	2,00	1,99			2,00	1,99	2,00	2,00	1,99
	6	6,01	5,98	6,01	6,02	5,98		6	6,01	5,98	6,02	6,02	5,98
		6,00	5,98	6,01	6,01	5,98			6,00	5,98	6,00	6,02	5,99
		6,01	5,99	6,02	6,02	5,99			6,01	5,98	6,01	6,02	5,98
	10	10,02	9,97	10,01	10,02	9,98		10	10,02	9,97	10,02	10,03	9,97
		10,01	9,97	10,02	10,03	9,97			10,01	9,97	10,02	10,02	9,96
		10,02	9,97	10,02	10,03	9,97			10,02	9,97	10,02	10,03	9,97
	16	16,03	15,93	16,03	16,03	15,95		16	16,02	15,94	16,02	16,03	15,94
		16,02	15,95	16,02	16,04	15,96			16,02	15,95	16,02	16,04	15,95
		16,02	15,95	16,03	16,04	15,96			16,02	15,94	16,02	16,03	15,94
	19,8	19,82	19,73	19,83	19,85	19,72		19,8	19,83	19,74	19,83	19,85	19,74
		19,82	19,73	19,83	19,85	19,74			19,83	19,73	19,83	19,84	19,73
		19,83	19,74	19,83	19,85	19,75			19,83	19,73	19,84	19,84	19,73

Таблица 7 – Результаты измерений напряжения при значениях температуры

$\varphi, \%$	x, B	y_1, B	y_2, B	y_3, B	y_4, B	y_5, B	$\varphi, \%$	x, B	y_1, B	y_2, B	y_3, B	y_4, B	y_5, B
50	0,6	0,601	0,599	0,601	0,602	0,599	70	0,6	0,600	0,599	0,600	0,601	0,598
		0,600	0,598	0,600	0,601	0,599			0,600	0,599	0,601	0,602	0,599
		0,601	0,599	0,601	0,602	0,599			0,600	0,599	0,600	0,601	0,598
	1	1,001	0,997	1,000	1,002	0,998		1	1,001	0,999	1,001	1,004	0,999
		1,001	0,998	1,001	1,003	0,999			1,000	0,998	1,000	1,003	0,998
		1,001	0,998	1,002	1,003	0,999			1,001	0,999	1,001	1,004	0,999
	1,6	1,601	1,596	1,601	1,604	1,597		1,6	1,601	1,597	1,601	1,605	1,597
		1,601	1,596	1,601	1,604	0,597			1,601	1,598	1,601	1,605	1,597
		1,601	1,596	1,600	1,603	1,597			1,601	1,597	1,600	1,605	1,597
	1,98	1,980	1,975	1,980	1,984	1,976		1,98	1,980	1,976	1,981	1,986	1,976
		1,981	1,974	1,980	1,983	1,975			1,981	1,976	1,980	1,985	1,976
		1,981	1,975	1,980	1,984	1,976			1,980	1,975	1,980	1,985	1,975
	2	2,00	2,00	2,01	2,02	2,00		2	1,99	1,99	2,00	2,00	1,99
		2,00	1,99	2,00	2,01	1,99			1,99	1,99	2,00	2,00	1,99
		2,00	1,99	2,00	2,00	1,99			1,99	1,99	2,00	2,00	1,99
	6	6,00	5,971	6,00	6,02	5,99		6	6,01	5,98	6,00	6,02	5,99
		6,00	5,98	6,00	6,01	5,98			6,00	5,98	6,00	6,02	5,99
		6,01	5,98	6,00	6,02	5,99			6,00	5,98	6,00	6,02	5,98
	10	10,01	9,97	9,99	10,02	9,97		10	10,01	9,98	10,00	10,03	9,98
		10,01	9,97	9,99	10,02	9,97			10,01	9,97	9,99	10,02	9,97
		10,01	9,97	10,00	10,03	9,98			10,01	9,97	9,99	10,03	9,97
	16	16,01	15,94	15,99	16,03	15,96		16	16,00	15,94	15,98	16,03	15,95
		16,01	15,94	15,98	16,03	15,96			16,00	15,95	15,99	16,04	15,95
		16,00	15,94	15,98	16,03	15,96			16,00	15,95	15,99	16,04	15,96
	19,8	19,81	19,72	19,78	19,83	19,75		19,8	19,79	19,73	19,77	19,84	19,73
		19,80	19,72	19,77	19,83	19,74			19,81	19,84	19,78	19,84	19,74
		19,81	19,73	19,78	19,83	19,74			19,80	19,72	19,77	19,84	19,73

Таблица 8 – Результаты измерений напряжения при значениях температуры окружающей среды 30 °С

$\varphi, \%$	x, B	y_1, B	y_2, B	y_3, B	y_4, B	y_5, B	$\varphi, \%$	x, B	y_1, B	y_2, B	y_3, B	y_4, B	y_5, B
40	0,6	0,600	0,599	0,600	0,602	0,600	60	0,6	0,599	0,598	0,600	0,601	0,599
		0,599	0,599	0,599	0,601	0,599			0,599	0,599	0,600	0,602	0,599
		0,600	0,599	0,599	0,602	0,600			0,599	0,599	0,599	0,601	0,599
	1	0,999	0,997	0,998	1,001	0,997		1	0,999	0,998	0,998	1,002	0,998
		1,000	0,999	1,000	1,004	1,000			0,999	0,998	0,999	1,002	0,998
		0,999	0,998	0,999	1,003	0,999			0,998	0,997	0,999	1,002	0,998
	1,6	1,599	1,597	1,599	1,604	1,598		1,6	1,597	1,596	1,598	1,603	1,597
		1,599	1,597	1,598	1,605	1,599			1,598	1,597	1,598	1,604	1,597
		1,599	1,597	1,599	1,605	1,599			1,598	1,596	1,598	1,604	1,597
	1,98	1,977	1,975	1,977	1,984	1,976		1,98	1,977	1,975	1,977	1,984	1,976
		1,978	1,976	1,979	1,986	1,978			1,977	1,975	1,977	1,984	1,975
		1,978	1,976	1,978	1,985	1,977			1,977	1,975	1,978	1,985	1,976
	2	2,00	2,00	2,00	2,01	2,00		2	2,00	1,99	2,00	2,00	1,99
		1,99	1,99	2,00	2,00	1,99			1,99	1,99	2,00	2,00	1,99
		2,00	1,99	2,00	2,00	1,99			2,00	2,00	2,00	2,01	2,00
	6	6,00	5,98	5,99	6,01	5,99		6	6,00	5,99	5,99	6,02	5,99
		6,00	5,99	5,99	6,02	5,99			6,00	5,99	5,99	6,02	5,99
		6,00	5,99	5,99	6,02	5,99			6,00	5,98	5,99	6,01	5,98

Продолжение таблицы 8

$\varphi, \%$	x, B	y_1, B	y_2, B	y_3, B	y_4, B	y_5, B	$\varphi, \%$	x, B	y_1, B	y_2, B	y_3, B	y_4, B	y_5, B
40	10	10,00	9,98	9,98	10,03	9,99	60	10	10,00	9,97	9,98	10,02	9,98
		10,00	9,98	9,98	9,97	9,99			10,00	9,97	9,98	10,02	9,98
		10,00	9,98	9,98	10,03	9,99			10,00	9,97	9,97	10,02	9,98
	16	16,00	15,96	15,96	16,04	15,97		16	16,00	15,96	15,96	16,04	15,97
		15,99	15,95	15,95	16,04	15,97			15,99	15,95	15,95	16,03	15,96
		16,00	15,96	15,96	16,05	15,98			16,00	15,96	15,96	16,04	15,97
	19,8	19,79	19,74	19,75	19,85	19,76		19,8	19,79	19,74	19,75	19,84	19,75
		19,79	19,75	19,74	19,85	19,77			19,80	19,75	19,75	19,84	19,75
		19,79	19,75	19,74	19,85	19,76			19,79	19,74	19,74	19,84	19,75

Таблица 9 – Результаты измерений напряжения при значениях температуры окружающей среды 40 °С

$\varphi, \%$	x, B	y_1, B	y_2, B	y_3, B	y_4, B	y_5, B	$\varphi, \%$	x, B	y_1, B	y_2, B	y_3, B	y_4, B	y_5, B
20	0,6	0,599	0,599	0,600	0,603	0,601	60	0,6	0,599	0,598	0,598	0,601	0,599
		0,598	0,600	0,599	0,602	0,600			0,598	0,598	0,599	0,601	0,599
		0,608	0,600	0,599	0,603	0,600			0,598	0,598	0,599	0,601	0,599
	1	0,997	1,000	0,988	0,998	0,998		1	0,997	0,997	0,997	1,001	0,998
		0,997	1,000	0,998	0,998	1,000			0,997	0,997	0,998	1,002	0,999
		0,997	1,000	0,998	0,998	1,001			0,997	0,997	0,998	1,002	0,999
	1,6	1,596	1,601	1,598	1,607	1,601		1,6	1,596	1,595	1,597	1,603	1,598
		1,596	1,601	1,598	1,602	1,601			1,595	1,595	1,596	1,603	1,598
		1,596	1,601	1,598	1,602	1,601			1,595	1,595	1,595	1,603	1,597
	1,98	1,975	1,981	1,977	1,984	1,982		1,98	1,973	1,974	1,975	1,984	1,978
		1,974	1,980	1,971	1,983	1,981			1,974	1,973	1,975	1,984	1,977
		1,974	1,981	1,977	1,989	1,981			1,973	1,974	1,975	1,984	1,977
	2	1,99	2,00	1,99	2,01	1,99		2	1,99	1,99	1,99	2,00	1,99
		1,99	2,00	1,99	2,01	1,99			1,99	2,00	1,99	2,00	2,00
		2,00	2,00	2,00	2,01	2,00			1,99	1,99	1,99	2,00	1,99
	6	6,00	6,00	5,98	6,03	6,00		6	5,99	5,98	5,98	6,01	5,99
		6,00	6,00	5,98	6,03	6,03			5,99	5,98	5,97	6,01	5,99
		6,00	6,00	5,98	6,03	6,00			5,99	5,98	5,98	6,01	5,99
	10	9,99	10,00	9,97	10,05	10,01		10	9,98	9,97	9,96	10,02	9,99
		9,99	10,00	9,96	10,04	10,00			9,98	9,97	9,97	10,02	9,99
		9,99	10,00	9,96	9,99	10,00			9,98	9,97	9,95	10,02	9,98
	16	15,99	16,00	15,94	16,01	16,00		16	15,97	15,95	15,93	16,04	15,98
		15,98	16,00	15,94	16,00	16,00			15,97	15,95	15,92	16,03	15,97
		15,97	15,99	15,93	16,06	15,99			15,97	15,95	15,93	16,04	15,98
	19,8	19,77	19,79	19,72	19,88	19,80		19,8	19,76	19,73	19,70	19,84	19,76
		19,77	19,79	19,72	19,78	19,79			19,76	19,74	19,71	19,85	19,77
		19,77	19,80	19,72	19,82	19,80			19,76	19,73	19,70	19,84	19,76

Для использования альтернативного метода были взяты $t = 1 \dots j = 8$ групп измерений, включающих в себя $n = 1 \dots k = 9$ результатов измерений (Таблица 10).

Таблица 10 – Результаты измерений значений калибровочных точек ЦМ1, при изменяющемся факторе

j	$T, ^\circ\text{C}$	$\varphi, \%$	$k=0,6 \text{ В}$	$k=1,0 \text{ В}$	$k=1,6 \text{ В}$	$k=1,98 \text{ В}$	$k=2,0 \text{ В}$	$k=6,0 \text{ В}$	$k=10,0 \text{ В}$	$k=16,0 \text{ В}$	$k=19,8 \text{ В}$
1	10	60	0,6008	0,9993	1,6025	1,9841	1,996	6,007	10,018	16,024	19,826
2	10	80	0,6023	1,0023	1,6035	1,9836	2,000	6,006	10,015	16,023	19,826
3	20	50	0,6006	1,0007	1,6009	1,9805	1,999	6,004	10,006	16,006	19,805
4	20	70	0,6002	1,0005	1,6008	1,9802	1,994	6,001	10,007	16,003	19,801
5	30	40	0,5995	0,9994	1,5988	1,9774	1,995	5,998	10,001	15,997	19,788
6	30	60	0,5989	0,9987	1,5975	1,9767	1,994	5,997	10,001	15,993	19,793
7	40	20	0,6016	0,9972	1,5958	1,9742	1,995	5,997	9,991	15,980	19,772
8	40	60	0,5981	0,9968	1,5953	1,9730	1,991	5,988	9,983	15,972	19,759
\bar{y}_j			0,6002	0,9994	1,5994	1,9787	1,995	6,000	10,003	16,000	19,796

Рекомендуемое значение $t(n - 1) > 15$. При $t = 8$, а $n = 9$, условие выполняется. Для обнаружения потенциальных выбросов был построен график зависимости $y_{\text{п}} = y_{jk} - \bar{y}_j$ по j (рисунок 4).

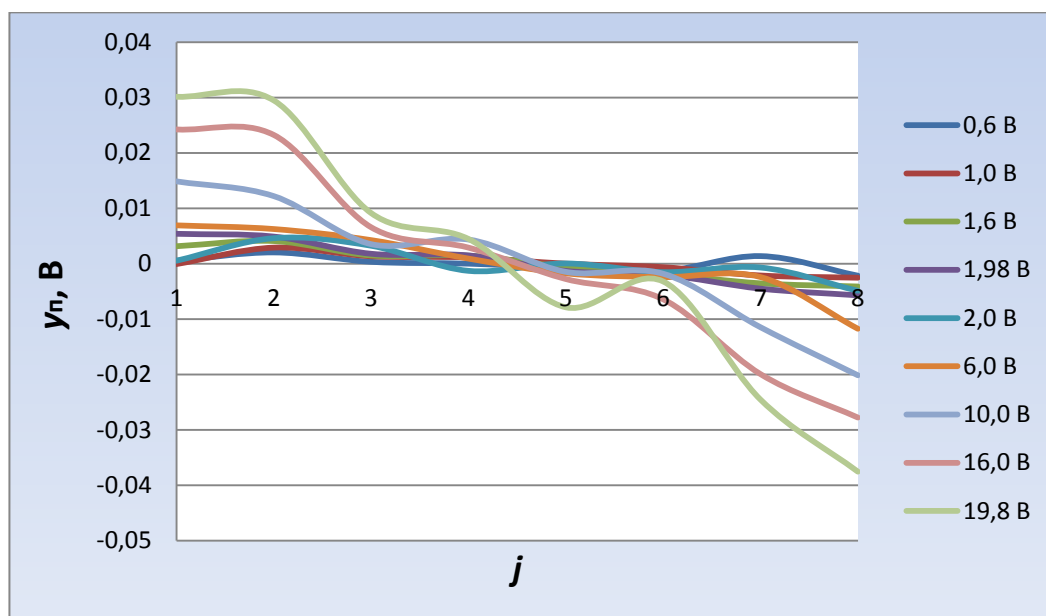


Рисунок 4 – Идентификация потенциальных выбросов в результатах измерений ЦМ1

Из рассмотрения кривых на рисунке 4 следует, что потенциальные выбросы отсутствуют. Ясно, что при увеличении значения калибровочной точки увеличивается погрешность. Наибольшие отклонения напряжения от среднего значения наблюдаются при наименьшем ($10 ^\circ\text{C}$, $j = 1$) и наибольшем ($40 ^\circ\text{C}$, $j = 8$) значениях температуры.

Экспериментальные исследования показали, что при нормальных условиях, т.е. при температуре окружающего воздуха в диапазоне $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $(65 \pm 15)\%$, погрешности всех экземпляров мультиметров одного типа МУ-64 не превышали допустимые значения. Выбросы в результатах измерений всех пяти экземпляров СИ не обнаружены.

Были вычислены оценки стандартного отклонения промежуточной прецизионности [16] по формуле (26) при двух изменяющихся факторах: температуре и влажности – для всех пяти экземпляров.

$$S_{I(\text{ЦМ1})} = 0,011;$$

$$S_{I(\text{ЦМ2})} = 0,010;$$

$$S_{I(\text{ЦМ3})} = 0,022;$$

$$S_{I(\text{ЦМ4})} = 0,004;$$

$$S_{I(\text{ЦМ5})} = 0,010.$$

Ясно, что наибольшую дополнительную погрешность имеет ЦМ3, а наименьшую – ЦМ4.

3 Построение линейных градуировочных характеристик методом наименьших квадратов

Рассмотрим экспериментальные данные, полученные при исследовании цифрового мультиметра (таблицы 6-9). Измерения выполнялись с многократными наблюдениями $n_i = 3$. Количество точек на пределе измерения 2 В постоянного напряжения $i = 1 \dots m$, где $m = 4$ и $m = 5$ на пределе измерений 20 В. Полученные результаты измерений \bar{y}_i были вычислены по формуле

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} y_i}{n_i} \quad (27)$$

Оценка дисперсии погрешности S_i^2 в точке y_i находится по формуле

$$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} (y_i - \bar{y}_i)^2}{n - 1} \quad (28)$$

Так как, входная величина X в данном эксперименте является контролируемой переменной (на входе устанавливалось заранее заданное значение X_i), то для построения ГХ можно применять МНК.[17]

Для построения линейной ГХ общего вида $Y = a + bX$, необходимо вычислить оценки a и b по МНК. Веса, определяемые по экспериментальным данным, принимаются равными $\omega_i = n_i / S_i^2$.

Среднее (взвешенное) значение \bar{X} входных величин X_i , находится по формуле

$$\bar{X} = \frac{\sum \omega_i X_i}{\sum \omega_i} \quad (29)$$

Среднее (взвешенное) значение \bar{y} результатов измерений \bar{y}_i , находится по формуле

$$\bar{y} = \frac{\sum \omega_i \bar{y}_i}{\sum \omega_i} \quad (30)$$

Оценки коэффициентов a и b , рассчитываются по формулам (31)-(32).

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \bar{y}_i (X_i - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n \omega_i (X_i - \bar{X})^2}, \quad (31)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{X} \quad (32)$$

Результаты вычислений коэффициентов регрессии для исследуемых экземпляров мультиметров Mastech MY-64 (ЦМ1-ЦМ5) приведены в таблицах А.1-А.5 (в промежуточных вычислениях удерживаются лишние значащие цифры).

3.1 Введение поправки в результат измерения

После того, как были вычислены оценки коэффициентов b и a , были записаны уравнения линейных ГХ вида $Y = a + bX$, для каждого цифрового мультиметра, соответствующие определенному пределу измерения при заданных температурах окружающей среды. На основании этих уравнений, были вычислены значения поправок и занесены в таблицу 11.[18]

Таблица 11 – Средние значения поправок

$t, ^\circ\text{C}$	$X_N, \text{В}$	$x, \text{В}$	$\bar{q}_1, \text{В}$	$\bar{q}_2, \text{В}$	$\bar{q}_3, \text{В}$	$\bar{q}_4, \text{В}$	$\bar{q}_5, \text{В}$
10	2	0,6	0,0010	0,0008	0,0004	0,0009	0,0005
		1	0,0031	0,0001	0,0003	0,0007	0,0007
		1,6	0,0006	0,0011	0,0009	0,0009	0,0007
		1,98	0,0003	0,0003	0,0005	0,0005	0,0007
	20	2	0,0020	0,0111	0,0020	0,0020	0,0022
		6	0,0022	0,0021	0,0049	0,0043	0,0019
		10	0,0048	0,0014	0,0066	0,0069	0,0028
		16	0,0007	0,0084	0,0042	0,0049	0,0044
		19,8	0,0053	0,0047	0,0023	0,0007	0,0122
20	2	0,6	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	0,0002
		1	0,0001	0,0002	0,0006	0,0003	0,0006
		1,6	0,0001	0,0001	0,0006	0,0003	0,0002
		1,98	0,0003	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002
	20	2	0,0048	0,0054	0,0031	0,0065	0,0054
		6	0,0021	0,0016	0,0005	0,0022	0,0029
		10	0,0013	0,0012	0,0012	0,0013	0,0015
		16	0,0031	0,0005	0,0022	0,0020	0,0031
		19,8	0,0018	0,0031	0,0031	0,0007	0,0045
30	2	0,6	0,0015	0,0005	0,0001	0,0002	0,0001
		1	0,0016	0,0002	0,0004	0,0003	0,0002
		1,6	0,0029	0,0002	0,0002	0,0002	0,0004
		1,98	0,0036	0,0003	0,0002	0,0002	0,0003
	20	2	0,0056	0,0056	0,0043	0,0022	0,0076
		6	0,0015	0,0033	0,0009	0,0030	0,0032
		10	0,0019	0,0007	0,0034	0,0007	0,0022
		16	0,0070	0,0020	0,0043	0,0023	0,0036
		19,8	0,0087	0,0061	0,0055	0,0019	0,0055

Продолжение таблицы 11

$t, ^\circ\text{C}$	$X_N, \text{В}$	$x, \text{В}$	$\bar{q}_1, \text{В}$	$\bar{q}_2, \text{В}$	$\bar{q}_3, \text{В}$	$\bar{q}_4, \text{В}$	$\bar{q}_5, \text{В}$
40	2	0,6	0,0004	0,0002	0,0004	0,0002	0,0003
		1	0,0003	0,0003	0,0005	0,0006	0,0007
		1,6	0,0004	0,0000	0,0004	0,0002	0,0003
		1,98	0,0005	0,0003	0,0002	0,0001	0,0004
	20	2	0,0033	0,0030	0,0020	0,0022	0,0058
		6	0,0007	0,0015	0,0042	0,0009	0,0016
		10	0,0006	0,0020	0,0067	0,0024	0,0026
		16	0,0018	0,0025	0,0039	0,0023	0,0030
		19,8	0,0092	0,0030	0,0011	0,0031	0,0057

3.2 Расчет СКО результата измерения и СКО поправки.

Среднеквадратическое отклонение результатов единичных измерений в ряду измерений – характеристика S рассеяния результатов измерений в ряду равноточных измерений одной и той же физической величины, вычисляемая по формуле

$$S(y_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}, \quad (33)$$

где y_i – результат i -го единичного измерения;

\bar{y} – среднее арифметическое значение n единичных результатов измерений величины.

СКО S является оценкой стандартного отклонения сигма-параметра распределения результатов измерений и одновременно оценкой стандартного отклонения распределения случайной погрешности этих результатов.

СКО неисправленных результатов измерений $S(y_i)$ и СКО поправок $S(q_i)$ приведены в таблице 12 и 13, соответственно.[19]

Таблица 12 – Среднеквадратическое отклонение неисправленных результатов измерений

$t, ^\circ\text{C}$	$X_N, \text{В}$	$x, \text{В}$	$S(y_1), \text{В}$	$S(y_2), \text{В}$	$S(y_3), \text{В}$	$S(y_4), \text{В}$	$S(y_5), \text{В}$
10	2	0,6	0,0012	0,0012	0,0006	0,0010	0,0006
		1	0,0049	0,0002	0,0004	0,0010	0,0010
		1,6	0,0010	0,0016	0,0012	0,0014	0,0012
		1,98	0,0005	0,0004	0,0008	0,0008	0,0008
	20	2	0,0024	0,0087	0,0030	0,0030	0,0030
		6	0,0023	0,0026	0,0050	0,0045	0,0026
		10	0,0042	0,0015	0,0072	0,0072	0,0044
		16	0,0010	0,0136	0,0046	0,0078	0,0067
		19,8	0,0049	0,0049	0,0031	0,0010	0,0131

Продолжение таблицы 12

$t, ^\circ\text{C}$	X_N, B	x, B	$S(y_1), \text{B}$	$S(y_2), \text{B}$	$S(y_3), \text{B}$	$S(y_4), \text{B}$	$S(y_5), \text{B}$
20	2	0,6	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0003
		1	0,0002	0,0004	0,0009	0,0004	0,0006
		1,6	0,0002	0,0002	0,0006	0,0004	0,0002
		1,98	0,0004	0,0003	0,0001	0,0003	0,0003
	20	2	0,0031	0,0041	0,0041	0,0070	0,0067
		6	0,0026	0,0023	0,0006	0,0032	0,0032
		10	0,0012	0,0012	0,0017	0,0017	0,0017
		16	0,0045	0,0006	0,0026	0,0026	0,0032
		19,8	0,0021	0,0031	0,0040	0,0010	0,0049
30	2	0,6	0,0004	0,0008	0,0002	0,0002	0,0002
		1	0,0003	0,0003	0,0006	0,0003	0,0003
		1,6	0,0003	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003
		1,98	0,0001	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
	20	2	0,0024	0,0025	0,0029	0,0025	0,0025
		6	0,0021	0,0031	0,0010	0,0031	0,0031
		10	0,0010	0,0010	0,0046	0,0010	0,0010
		16	0,0029	0,0029	0,0050	0,0029	0,0058
		19,8	0,0079	0,0079	0,0075	0,0025	0,0025
40	2	0,6	0,0005	0,0003	0,0006	0,0003	0,0003
		1	0,0004	0,0004	0,0006	0,0009	0,0009
		1,6	0,0003	0,0001	0,0006	0,0003	0,0003
		1,98	0,0004	0,0005	0,0003	0,0001	0,0005
	20	2	0,0020	0,0040	0,0020	0,0020	0,0048
		6	0,0010	0,0021	0,0038	0,0010	0,0021
		10	0,0006	0,0032	0,0078	0,0035	0,0026
		16	0,0026	0,0032	0,0026	0,0026	0,0026
		19,8	0,0040	0,0036	0,0012	0,0036	0,0036

Таблица 13 – Среднеквадратическое отклонение значений поправок

$t, ^\circ\text{C}$	X_N, B	x, B	$S(q_1), \text{B}$	$S(q_2), \text{B}$	$S(q_3), \text{B}$	$S(q_4), \text{B}$	$S(q_5), \text{B}$
10	2	0,6	0,0002	0,0007	0,0005	0,0001	0,0002
		1	0,0042	0,0001	0,0002	0,0006	0,0007
		1,6	0,0009	0,0009	0,0011	0,0008	0,0009
		1,98	0,0003	0,0002	0,0004	0,0004	0,0001
	20	2	0,0024	0,0088	0,0026	0,0027	0,0029
		6	0,0007	0,0007	0,0037	0,0045	0,0024
		10	0,0042	0,0007	0,0014	0,0023	0,0039
		16	0,0006	0,0117	0,0022	0,0064	0,0046
		19,8	0,0038	0,0017	0,0022	0,0005	0,0131
20	2	0,6	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002
		1	0,0001	0,0002	0,0008	0,0002	0,0003
		1,6	0,0001	0,0001	0,0003	0,0003	0,0001
		1,98	0,0004	0,0002	0,0001	0,0003	0,0002
	20	2	0,0031	0,0041	0,0021	0,0043	0,0022
		6	0,0008	0,0015	0,0001	0,0029	0,0007
		10	0,0011	0,0008	0,0017	0,0017	0,0001
		16	0,0024	0,0002	0,0006	0,0009	0,0014
		19,8	0,0021	0,0022	0,0020	0,0005	0,0010
30	2	0,6	0,0004	0,0006	0,0001	0,0001	0,0001
		1	0,0003	0,0002	0,0006	0,0001	0,0003
		1,6	0,0003	0,0002	0,0001	0,0001	0,0003
		1,98	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0003

Продолжение таблицы 13

$t, ^\circ\text{C}$	$X_N, \text{В}$	$x, \text{В}$	$S(q_1), \text{В}$	$S(q_2), \text{В}$	$S(q_3), \text{В}$	$S(q_4), \text{В}$	$S(q_5), \text{В}$
30	20	2	0,0027	0,0063	0,0014	0,0015	0,0049
		6	0,0017	0,0031	0,0006	0,0030	0,0025
		10	0,0010	0,0006	0,0019	0,0005	0,0010
		16	0,0029	0,0018	0,0032	0,0007	0,0050
		19,8	0,0069	0,0027	0,0040	0,0017	0,0025
40	2	0,6	0,0002	0,0002	0,0003	0,0001	0,0001
		1	0,0002	0,0002	0,0002	0,0005	0,0002
		1,6	0,0003	0,0000	0,0003	0,0002	0,0001
		1,98	0,0004	0,0004	0,0001	0,0000	0,0001
	20	2	0,0020	0,0022	0,0012	0,0020	0,0048
		6	0,0006	0,0011	0,0034	0,0008	0,0007
		10	0,0004	0,0026	0,0078	0,0021	0,0012
		16	0,0023	0,0032	0,0027	0,0005	0,0025
		19,8	0,0040	0,0036	0,0005	0,0036	0,0036

3.3 Оценка воспроизводимости результатов измерений разными экземплярами средств измерений

Для выполнения данного анализа были взяты пять экземпляров мультиметров Mastech MY-64.

Анализ проводился при сравнении неисправленных и исправленных результатов измерения постоянного напряжения при выходном напряжении источника питания $x = 6 \text{ В}$.

$$\Delta 1 = y_{\text{испр}} - x, \quad (34)$$

$$\Delta 2 = y - x, \quad (35)$$

где x – выходное напряжение ИП, В;

y – неисправленный РИ, В;

$y_{\text{испр}}$ – исправленный РИ, В.

Графики сравнения погрешностей для ЦМ1-ЦМ5 представлены на рисунках 5-9. Значения результатов измерений были взяты по модулю, для удобства представления.

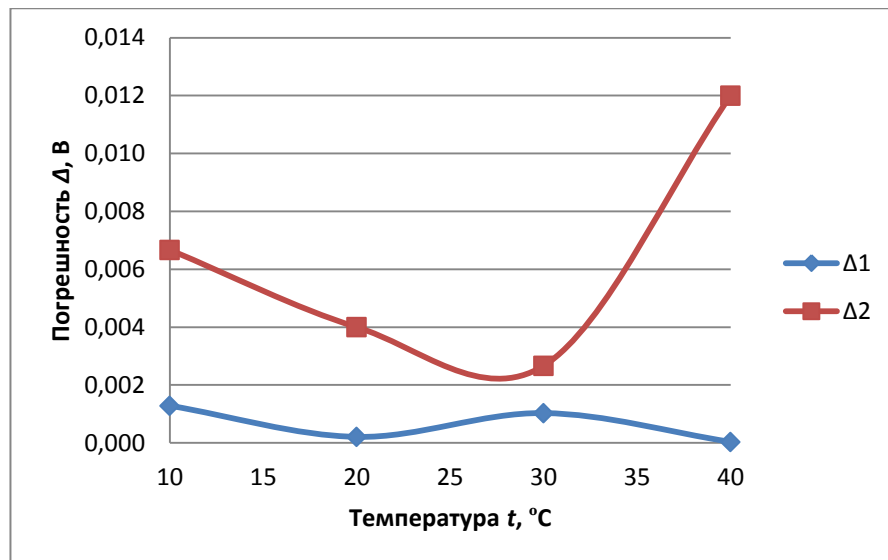


Рисунок 5 – График сравнения погрешностей исправленных и неисправленных результатов измерения с выходным напряжением ИП для ЦМ1

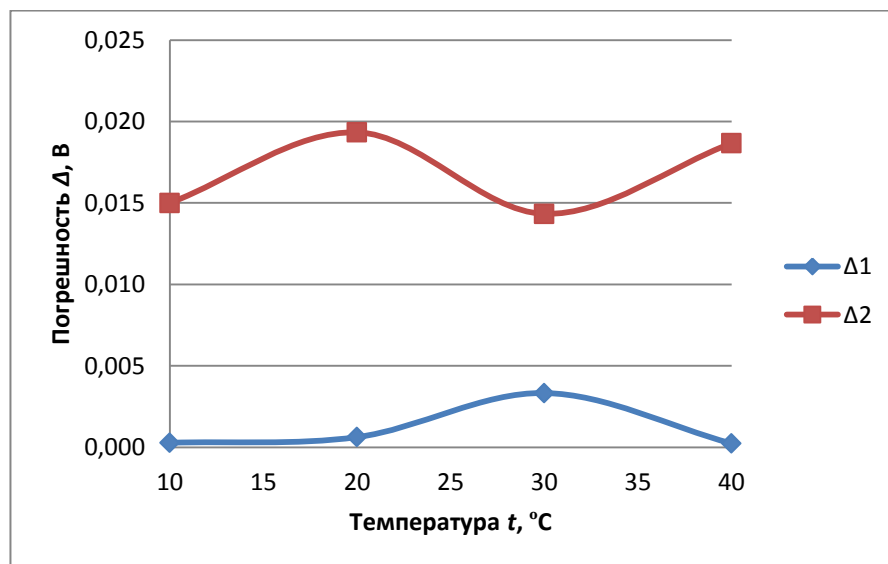


Рисунок 6 – График сравнения погрешностей исправленных и неисправленных результатов измерения с выходным напряжением ИП для ЦМ2

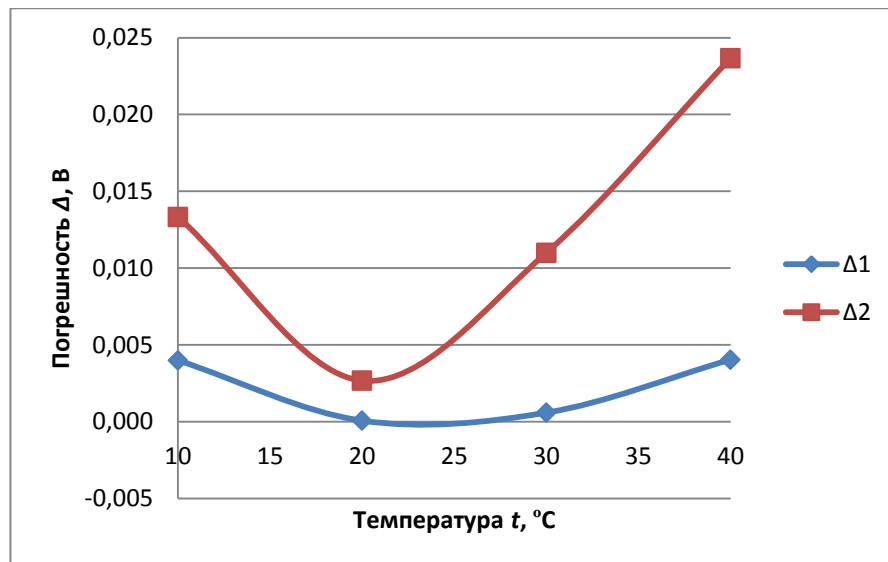


Рисунок 7 – График сравнения погрешностей исправленных и неисправленных результатов измерения с выходным напряжением ИП для ЦМ3

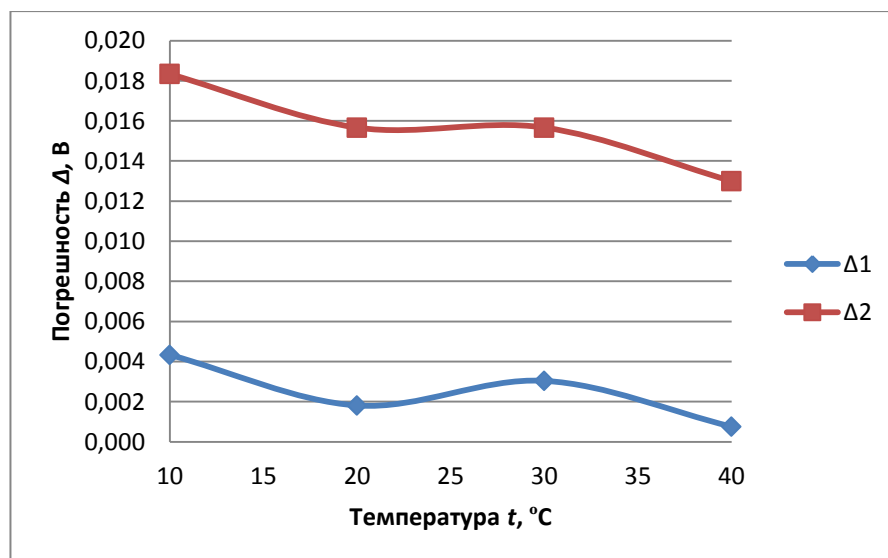


Рисунок 8 – График сравнения погрешностей исправленных и неисправленных результатов измерения с выходным напряжением ИП для ЦМ4

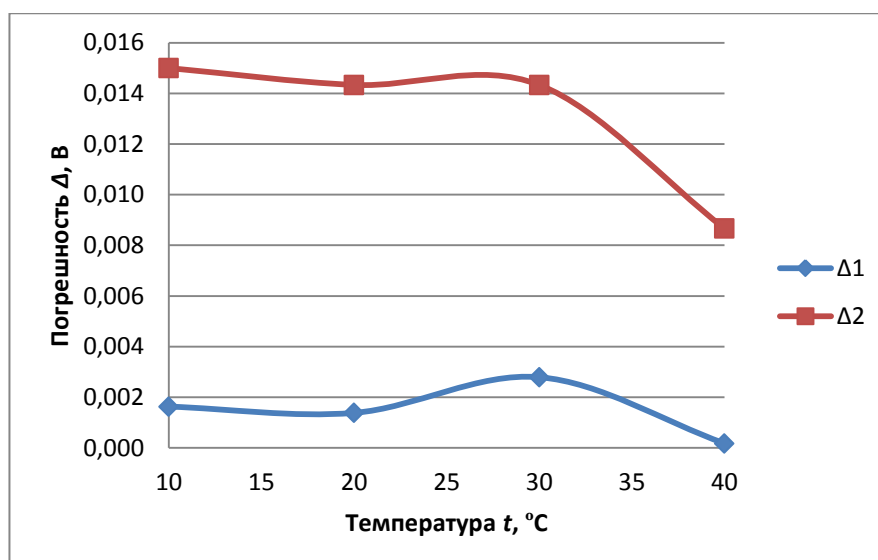


Рисунок 9 – График сравнения погрешностей исправленных и неисправленных результатов измерения с выходным напряжением ИП для ЦМ5

Расположение кривых показывает близость РИ к исходному значению. Из рисунка 7 и 9 видно, что погрешность неисправленных результатов экземпляров ЦМ2 и ЦМ4 достаточно высока и колеблется от 0,013 В до 0,020 В на всем диапазоне температур. Экземпляры ЦМ1 и ЦМ3 оказались менее стабильны к изменениям окружающей среды и имеют скачок роста погрешности измерений напряжения при восприятии температуры окружающей среды – 40 °С. Следует сделать вывод, что погрешность неисправленных результатов экземпляров СИ одного типа при введении поправки близится к нулю.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Цель магистерской диссертации – применить метод регрессионного анализа для построения градуировочной характеристики СИ. Следовательно, исследования, проведенные в рамках написания магистерской диссертации, не несут в себе особых денежных затрат.

Таким образом, в разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» будут рассмотрены следующие вопросы:




- потенциальные потребители результатов исследования;
- анализ конкурентных технических решений;
- SWOT-анализ;
- структура работ в рамках научного исследования;
- трудоемкость выполнения работ;
- график проведения научного исследования;
- бюджет научно-технического исследования (НТИ).

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для того, чтобы определить потенциальный потребителей научной разработки необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование. Сегментирование рынка методов, используемых для определения параметров градуировочной характеристики, приведено на рисунке 10.

		Методы определения параметров градуировочной характеристики			
		Метод «самой глубокой» регрессии	Метод Тейла	Метод наименьших абсолютных отклонений	Метод наименьших квадратов
Размер компании	Крупные				
	Средние				
	Мелкие				

Рисунок 10 – Карта сегментирования рынка по способам повышения точности измерений:

 - Фирма А,  - Фирма Б,  - Фирма В.

В приведенном примере карты сегментирования показано, какие ниши на рынке не заняты конкурентами или где уровень конкуренции низок. Выбирают два-три сегмента, на которые и направляют максимальные усилия и ресурсы предприятия. Как правило, выбирают сегменты со сходными характеристиками, которые будут формировать целевой рынок.

По итогам сегментирования определены основные сегменты рынка. Методы определения параметров градуировочной характеристики необходимо внедрять во все компании, вне зависимости от ее размера. Метод «самой глубокой» регрессии, необходимо внедрить в средние и крупные компании, так как в «мелких» компаниях данный способ уже используется.

4.2 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

– конкурентоспособность разработки;

- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);

- бюджет разработки;

- уровень проникновения на рынок;

- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, пример которой приведен в таблице 14. Для этого необходимо отобрать не менее трех-четырех конкурентных товаров или разработок.

Таблица 14 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,43	5	5	3	2,15	2,15	1,29
2. Уровень проникновения на рынок	0,10	4	4	3	0,40	0,40	0,30
3. Цена	0,22	2	5	1	0,44	1,10	0,22
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,10	4	4	2	0,40	0,40	0,20
5. Финансирование научной разработки	0,10	3	5	3	0,30	0,50	0,30
6. Срок выхода на рынок	0,05	4	2	5	0,20	0,10	0,25
Итого	1	22	25	17	3,89	4,65	2,56

Критерии для сравнения и оценки ресурсосбережения, приведенные в таблице 1, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле (5.1)

$$K = \sum B_i \cdot B_i \quad (5.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Рассматривая метод регрессионного анализа с точки зрения экономической эффективности, то можно сказать, что метод не требует больших финансовых затрат и достаточно конкурентоспособен на рынке.

4.3 SWOT- анализ

SWOT– Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Результаты первого этапа SWOT-анализа приведены в таблице 15.

Таблица 15– Первый этап SWOT-анализа

Сильные стороны научно-исследовательского проекта:	С1. Повышение качества выполняемых работ. С2. Сокращение затрат на дорогое оборудование С3. Использование приборов не в лабораторных условиях С4. Квалифицированный персонал
Слабые стороны научно-исследовательского проекта:	Сл1. Затраты времени на анализ Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой Сл3. Неправильная интерпретация данных
Возможности:	В1. Использование сотрудниками ТПУ В2. Использование сотрудниками ЦСМ и различных предприятий В3. Появление дополнительного спроса на новый продукт В4. Повышение стоимости конкурентных разработок
Угрозы:	У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства У2. Развитая конкуренция технологий производства У3. Введения дополнительных требований У4. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства

После того как сформулированы четыре области SWOT переходят к реализации второго этапа.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Возможно использование этой матрицы в качестве одной из основ для оценки вариантов стратегического выбора. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильным сторонам возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Пример интерактивной матрицы проекта представлен в таблице 16.

Таблица 16 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	+	-	+
	B2	+	+	+	+
	B3	-	0	0	-
	B4	+	-	+	-
Слабые стороны проекта					
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	
	B1	+	+	+	
	B2	+	+	+	
	B3	-	-	-	
	B4	-	-	-	
Сильные стороны проекта					
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4
	У1	+	0	-	+
	У2	+	-	-	-
	У3	+	-	+	+
	У4	+	-	-	-
Слабые стороны проекта					
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	
	У1	-	+	-	
	У2	-	-	-	
	У3	+	+	+	
	У4	-	-	-	

В рамках третьего этапа должна быть составлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая приводится в магистерской диссертации (таблица 17).

Таблица 17- Матрица *SWOT*

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Повышение качества выполняемых работ. С2. Сокращение затрат на дорогое оборудование С3. Использование приборов не в лабораторных условиях С4. Квалифицированный персонал	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Затраты времени на анализ. Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой. Сл3. Неправильная интерпретация данных.
Возможности: В1. Использование сотрудниками ТПУ. В2. Использование сотрудниками ЦСМ и различных предприятий. В3. Появление дополнительного спроса на новый продукт. В4. Повышение стоимости конкурентных разработок.	Таким образом, сотрудники ТПУ, ЦСМ смогут повысить качество выполняемых работ, без покупки дорогостоящего оборудования. Использование приборов в условиях отличных от нормальных, повлечет за собой появление дополнительного спроса на продукт.	По началу использования данной методикой возникнуть трудности в связи с отсутствием квалифицированных кадров, что повлечет за собой неправильную интерпретацию данных. Также, данная методика будет отнимать у сотрудников дополнительное время на отдых.
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства. У2. Развитая конкуренция технологий производства. У3. Введения дополнительных требований. У4. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства	Нежелание предприятий повышать уровень качества выполняемых работ повлекут к отсутствию спроса. А также возможен выбор в пользу другого метода. Также вероятнее всего придется писать дополнительную документацию к применению данного метода и набирать квалифицированный персонал.	Большинство предприятий могут отказаться от применения данного метода, с целью экономии времени на другие задачи. Отсутствие спроса на новые технологии производства может быть из-за того, что будет необходимо проводить переквалификацию персонала, а также доп. курсы, что повлечет за собой финансовые затраты.

4.4 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения научного исследования была создана рабочая группа, в которую вошли научный руководитель (НР) и непосредственно студент (С), выполняющий написание магистерской диссертации.

В данном подразделе был создан перечень работ и отдельных этапов в рамках проведения исследования, а также приведены исполнители по каждому виду работ. Данный перечень представлен в таблице 18.

Таблица 18 – Перечень работ, этапов и распределение исполнителей

Основные этапы	Номер работы	Содержание работ	Исполнитель
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	НР
Выбор направления исследования	2	Подбор и изучение материала по теме	С
	3	Выбор направления исследования	НР, С
	4	Календарное планирование работ по теме	НР, С
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Изучение теоретического материала по выбранному направлению	С
	6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	С
	7	Проведение эксперимента	С
	8	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	С
Обобщение и оценка результатов	9	Оценка эффективности полученных результатов	НР, С

4.5 Определение трудоемкости выполнения работ

Определение трудоемкости выполнения работ для каждого исполнителя является важным моментом, т.к. трудовые затраты чаще всего являются основной частью стоимости проведенного исследования.

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости $t_{ожі}$ рассчитывали по формуле (5.2).

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (5.2)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемое значение трудоемкости выполнения i -ой работы, чел.-дн.;

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость заданной i -ой работы, чел.-дн.;

t_{maxi} – максимально возможная трудоемкость заданной i -ой работы, чел.-дн.

Исходя из полученных значений $t_{ожі}$, рассчитывается продолжительность каждого вида работы в рабочих днях T_p по формуле (5.3).

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{ч_i}, \quad (5.3)$$

где T_{pi} – продолжительность одной i -ой работы, раб. дн.;

$ч_i$ – численность исполнителей, одновременно выполняющих одну и ту же работу на определенном этапе, чел.

4.6 Составление графика проведения научного исследования

В качестве графика проведения научного исследования использовалась диаграмма Ганта, т.к. она является наиболее наглядным и удобным способом построения ленточного графика.

Для удобства разработки графика необходимо перевести длительность каждого этапа работ из рабочих дней в календарные. Продолжительность

выполнения i -ой работы в календарных днях T_{Ki} рассчитывается по формуле (5.4).

$$T_{Ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (5.4)$$

где $k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности, в свою очередь, рассчитывается по формуле (5.5).

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (5.5)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

В соответствии с производственным календарем на 2018 год календарных дней – 365, выходных и праздничных дней при шестидневной рабочей неделе – 66. Таким образом, получили значение $k_{\text{кал}} = 1,22$.

Все рассчитанные значения были занесены в таблицу 19.




Таблица 19 – Временные показатели проведения НТИ

Номер работы	Исполнители	Трудоемкость работ			Длительность работ в рабочих днях T_{pi} , раб. дн.	Длительность работ в календарных днях T_{Ki} , кал. дн.
		t_{\min} , чел.-дн.	t_{\max} , чел.-дн.	$t_{\text{ож}}i$, чел.-дн.		
1	НР	1	2	1,4	1,4	2
2	С	7	9	7,8	7,8	10
3	НР	4	7	5,2	2,6	3
	С	4	7	5,2	2,6	3
4	НР	4	6	4,8	2,4	3
	С	4	6	4,8	2,4	3
5	С	20	25	22	22	27
6	С	10	13	11,2	11,2	14
7	С	23	28	25	25	31
8	С	5	7	5,8	5,8	7
9	НР	2	3	2,4	1,2	1
	С	2	3	2,4	1,2	1
Итого	НР				7,6	9
	С				78	96

На основании таблицы 6 был построен календарный план-график. Данный график строится для наибольшего по длительности исполнения работ в рамках исследовательской работы с разбиением по месяцам, а затем по декадам

за период времени написания дипломной работы. При этом на графике работы для научного руководителя выделены косой штриховкой, а студента – сплошной заливкой. Перечень работ, этапов и распределение исполнителей представлен в таблице 18.

Таблица 20 – Календарный план-график

Номер работы	Исполнители	Т _{Кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ											
			Февраль		Март			Апрель			Май			
			2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	НР	2												
2	С	10												
3	НР	3												
	С	3												
4	НР	3												
	С	3												
5	С	27												
6	С	14												
7	С	31												
8	С	7												
9	НР	1												
	С	1												

4.7 Определение бюджета научно-технического исследования

Планируя бюджет научно-технического исследования (НТИ), необходимо обеспечить достоверное и полное отражение всех видов расходов, которые связаны с его выполнением. Для определения бюджета НТИ в рамках выполнения магистерской диссертации с учетом выбранного направления исследования и исполнителей работ были рассчитаны следующие виды затрат:

- материальные затраты НТИ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;

- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

4.7.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

В рамках расчета материальных затрат НТИ должны быть учтены:

- приобретаемые сырье и материалы, необходимые для создания продукции;
- покупаемые материалы, необходимые для поддержания нормального технологического процесса;
- затраты на дополнительные комплектующие;
- сырье, материалы, различные комплектующие изделия, применяемые в качестве объектов исследования;
- затраты на канцелярские принадлежности.

Т.к. исследование в рамках выполнения магистерской диссертации включает в себя лишь аналитический обзор, а также использование определенного метода на конкретном примере, то оно предусматривает затраты лишь на канцелярские принадлежности. А именно, в ходе выполнения работы была приобретена пачка бумаги формата А4 и заправлен картридж для принтера.

Материальные затраты Z_M на i -й материальный ресурс рассчитывается по формуле (5.6):

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m (C_i \cdot N_{расхi}), \quad (5.6)$$

где k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы;

m – количество видов материальных ресурсов, используемых для выполнения научного исследования;

C_i – цена на приобретение i -го вида приобретаемого материального ресурса;

$N_{расхi}$ – количество материального ресурса i -го вида, которое планируется для использования при выполнении научного исследования.

Значения цен были взяты на основании чеков после приобретения соответствующего вида продукции.

После проведения расчетов материальных затрат результаты занесли в таблицу 21.

Таблица 21 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы $З_M$, руб.
Заправка картриджа	шт.	1	280	280
Пачка бумаги формата А4	шт.	1	250	250
Итого			530	530

В ходе научно-технического исследования у приобретенных видов продукции не было остатков, следовательно, не нужно исключать стоимость возвратных отходов.

4.7.2 Расчет основной заработной платы исполнителей темы

В рамках данного подраздела рассчитывается основная заработная плата для всех исполнителей, участвующих в проведении НТИ. Величина расходов по заработной плате рассчитывается на основании трудоемкости выполняемых работ, а также действующей системы тарифных ставок и окладов.

Заработная плата участников выполнения НТИ учитывает как основную заработную плату, так и дополнительную и рассчитывается по формуле (5.7)

$$C_{зп} = З_{осн} + З_{доп}, \quad (5.7)$$

где: $З_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата, принятая за 15 % от основной заработной платы.

В свою очередь основная заработная плата одного исполнителя от предприятия рассчитывается по формуле (5.8)

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot Т_{\text{р}}, \quad (5.8)$$

где $З_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата, руб.;

$Т_{\text{р}}$ – продолжительность работ, которые выполняются исполнителем, раб. дн.

Среднедневная заработная плата $З_{\text{дн}}$ определяется по формуле (5.9)

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot М}{F_{\text{д}}}, \quad (5.9)$$

где $З_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад, руб.;

$М$ – количество месяцев работы исполнителя без отпуска в течение года: при шестидневной рабочей неделе и отпуске в 48 рабочих дней значение $М$ составляет 10,4 месяца, при отпуске в 24 рабочих дня значение $М$ составляет 11,2;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Для расчета действительного годового фонда рабочего времени была заполнена таблица 22.

Таблица 22 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	НР	С
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней: - выходные дни; - праздничные дни	66	66
Потери рабочего времени: - отпуск; - невыходы по болезни - командировка	48 - 70	24 - -
Действительный годовой фонд рабочего времени	181	275

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле (5.10)

$$З_{\text{м}} = З_{\text{б}} \cdot k_{\text{р}}, \quad (5.10)$$

где: $З_{\text{б}}$ – базовый оклад, руб.;

k_p – районный коэффициент (для г. Томска – 30%).

Исполнители: НР – научный руководитель (доктор технических наук, профессор). С – студент (УВП). Расчет заработной платы производится в соответствии с окладами из отраслевой системы оплаты труда в ТПУ.

По результатам расчетов была заполнена таблица 23.

Таблица 23 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	З _б , руб	k_p , %	З _м , руб	З _{дн} , руб	Т _р , раб. дн.	З _{осн} , руб.
НР	47104	30	61235,2	3518,5	9	31666,5
С	9489	30	12335,7	502,4	96	48230,4
Итого						79896,9

4.7.3 Расчет дополнительной заработной платы исполнителей темы

Дополнительная заработная плата учитывает величину доплат за отклонения от нормальных условий труда, предусмотренных Трудовым кодексом Российской Федерации, а также выплаты, связанные с обеспечением компенсаций и гарантий.

Дополнительная заработная плата $З_{\text{доп}}$ рассчитывается по формуле (5.12)

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}, \quad (5.12)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы, принятый на стадии проектирования за 0,15.

В результате получили следующие значения:

$$З_{\text{доп(НР)}} = 4749,97 \text{ руб.};$$

$$З_{\text{доп(С)}} = 7234,56 \text{ руб.}$$

4.7.4 Расчет отчислений во внебюджетные фонды

Данная статья расходов отражает обязательные отчисления по нормам, установленным законодательством Российской Федерации, органам

пенсионного фонда, государственного социального страхования, медицинского страхования, а также затраты на оплату труда работников.

Отчисления во внебюджетные фонды $Z_{\text{внеб}}$ рассчитывается по формуле (5.13)

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (5.13)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент уплаты во внебюджетные фонды, принятый равным 30 % для учреждений, осуществляющих научную деятельность.

Величина отчислений во внебюджетные фонды представлена в таблице 24.

Таблица 24 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	$Z_{\text{осн}}$, руб.	$Z_{\text{доп}}$, руб	$k_{\text{внеб}}$, %	$Z_{\text{внеб}}$, руб
НР	31666,5	4749,97	0,30	10924,94
С	48230,4	7234,56	0,30	16639,49
Итого	79896,9	11984,53	-	27564,43

4.7.5 Расчет накладных расходов

В накладные расходы должны быть включены те затраты организации, которые не попали в предыдущие статьи расходов: оплата электроэнергии, услуг связи, размножение материалов, печать и ксерокопирование материалов и т.д.

Накладные расходы $Z_{\text{накл}}$ рассчитываются по формуле (5.14)

$$Z_{\text{накл}} = (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + Z_{\text{внеб}}) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (5.14)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент накладных расходов, взятый в размере 16 %.

Получили следующие значения:

$$Z_{\text{накл(НР)}} = 3787,29 \text{ руб.};$$

$$Z_{\text{накл(С)}} = 5768,36 \text{ руб.}$$

4.7.6 Формирование бюджета затрат научно-технического исследования

Полученная в результате величина затрат на научно-исследовательскую работу является базой для формирования бюджета затрат на проект. Определение бюджета затрат на НТИ представлено в таблице 25.

Таблица 25 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.		Номер пункта
	НР	С	
Материальные затраты НТИ	-	530,00	5.7.1
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	15833,16	24115,2	5.7.2
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	2374,97	3617,28	5.7.3
Отчисления во внебюджетные фонды	5462,44	8319,74	5.7.4
Накладные расходы	3787,29	5768,36	5.7.5
Бюджет затрат НТИ	27457,86	42350,58	5.7.1 - 5.7.5
ИТОГО общих затрат	69808,44 руб.		

4.8 Определение социальной эффективности исследования

Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для сотрудников различных предприятий, в том числе, как непосредственные результаты проекта, так и сама техника исполнения для решения поставленных задач.

Для оценки социальной эффективности научного проекта необходимо выявить критерии социальной эффективности, на которые влияет реализация

научного проекта, и оценить степень их влияния. В таблице 26 приведена оценка социальной эффективности после применения метода регрессионного анализа на результат измерений с учетом дополнительных факторов.

Таблица 26 – Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Покупка дорогостоящего оборудования для обеспечения более высокой точности прибора	Повышение точности измерений менее точного экземпляра средства измерений, за счет введения поправки в результат измерений.
Ограничение условий применения средств измерений	Учет воздействия определенного фактора окружающей среды (температура, влажность и тд.)
Применение методик выполнения измерений, точность которой признана неудовлетворительной из-за возможных значительных неблагоприятных последствий	Разработка или совершенствование методик выполнения измерений с учетом дополнительных факторов
Выпуск недоброкачественной продукции	Повышение качества выпускаемой продукции, снижение брака

5 Социальная ответственность

В данном разделе рассмотрены вопросы, связанные с организацией рабочего места и условий в которых будет реализовываться разработка, полученная в ходе написания магистерской диссертации, а именно, способ повышения точности измерений, путем градуировки средств измерений, в соответствии с нормами производственной санитарии, техники безопасности и охраны труда и окружающей среды.

Разработку, полученную в ходе написания данной работы, будет использовать инженер-метролог. Рабочим местом является лаборатория, рабочей зоной является стол с приборами.

В данном разделе указаны такие вредные и опасные факторы, оказывающие негативное влияние на организм человека, как неоптимальный микроклимат помещения, электромагнитное излучение, недостаточность освещения и электрический ток. Так же указан характер вредного воздействия данных факторов на организм и последствия их длительного или чрезмерного воздействия.

Так же были указаны ЧС, которые могут произойти на рабочем месте и действия, которые необходимо выполнить в случае их возникновения.

5.1 Производственная безопасность

Таблица 27 – Опасные и вредные факторы при выполнении работ по повышению точности измерений, путем градуировки средств измерений

Вредные и опасные факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015[2])	Нормативные документы
Вредные 1. Отклонение показателей микроклимата 2. Недостаточная освещенность рабочей зоны 3. Повышенный уровень электромагнитных излучений 4. Повышенный уровень шума на рабочем месте 5. Длительность сосредоточенного наблюдения Опасные 1. Статическое электричество 2. Поражение электрическим током 3. Короткое замыкание	Для регламентации вредных факторов 1. Параметры микроклимата устанавливаются СанПиН 2.2.4.548-96 [3]. 2. Требования к естественному и искусственному освещению устанавливаются СП 52.13330.2011 [4]. 3. Параметры электромагнитного излучения устанавливаются СанПиН 2.2.4.1191-2003 [5]. 4. Параметры уровня шума устанавливаются СанПин 2.2.4.3359-2016 [6]; 5. Параметры длительности сосредоточенного наблюдения Р 2.2.2006-2005 [7] Для регламентации опасных факторов 1. Требования по электробезопасности устанавливаются ГОСТ Р 12.1.019-2009 [8].

5.1.1 Отклонение показателей микроклимата

Микроклимат производственных помещений – метеорологические условия внутренней среды помещений, которые определяются действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности, скорости движения воздуха и теплового излучения; комплекс физических факторов, оказывающих влияние на теплообмен человека с окружающей средой, на тепловое состояние человека и определяющих самочувствие, работоспособность, здоровье и производительность труда. Показатели микроклимата: температура воздуха и его относительная влажность, скорость его движения, мощность теплового излучения.

Основные виды работ, выполняемые инженером-метрологом, по степени физической тяжести, относятся к категории легких работ. Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений, в соответствии с периодом года и категорией работ, согласно СанПиН 2.2.4.548 [3], предоставлены в таблице 28, а допустимые величины показателей приведены в таблице 29.

Таблица 28 – Оптимальные параметры микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Категория Ia (до 139)	23 – 25	40 – 60	0,1
Теплый	Категория Ia (до 139)	20 – 22	40 – 60	0,1

Таблица 29 – Допустимые параметры микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Категория Ia (до 139)	20 – 21,9	15 – 75	0,1
Теплый	Категория Ia (до 139)	21 – 22,9	15 – 75	0,1

В соответствии с характеристикой помещения определен предполагаемый расход свежего воздуха. Нормы подачи свежего воздуха приведены в таблице 30.

Таблица 30 – Нормы подачи свежего воздуха в помещения, где расположены компьютеры

Характеристика помещения	Объемный расход подаваемого в помещение свежего воздуха, м ³ /на одного человека в час
Объем до 20 м ³ на человека 20...40 м ³ на человека Более 40 м ³ на человека	Не менее 30 Не менее 20 Естественная вентиляция

Для создания благоприятных условий труда и повышения производительности, необходимо поддерживать оптимальные параметры микроклимата производственных помещений. Для этого должны быть предусмотрены следующие средства: центральное отопление, функционирующее в зимнее время, вентиляция (искусственная и естественная), искусственное кондиционирование. Комната инженера-метролога для выполнения работ по повышению точности измерений соответствует нормам.

5.1.2 Недостаточная освещённость рабочей зоны

Освещённость – световая величина, равная отношению светового потока, падающего на малый участок поверхности, к его площади. Освещённость измеряется в Люксах (СИ) и обозначают её буквой Е.

Хорошее освещение действует тонизирующе, создаёт хорошее настроение, улучшает протекание основных процессов нервной высшей деятельности. Улучшение освещённости способствует улучшению работоспособности даже в тех случаях, когда процесс труда практически не зависит от зрительного восприятия.

Работая при освещении плохого качества или низких уровней, люди могут ощущать усталость глаз и переутомление, что приводит к снижению работоспособности. В ряде случаев это может привести к головным болям.

Причинами во многих случаях являются слишком низкие уровни освещенности, слепящее действие источников света и соотношение яркостей, которое недостаточно хорошо сбалансировано на рабочих местах. Головные боли также могут быть вызваны пульсацией освещения, что в основном является результатом использования электромагнитных пускорегулирующих аппаратов (ПРА) для газоразрядных ламп, работающих на частоте 50 Гц.

Освещённость на рабочем месте должна соответствовать характеру зрительной работы; равномерное распределение яркости на рабочей поверхности и отсутствие резких теней; величина освещения постоянна во времени (отсутствие пульсации светового потока); оптимальная направленность светового потока и оптимальный спектральный состав; все элементы осветительных установок должны быть долговечны, взрыво-, пожаро-, электробезопасны.

Работа с приборами относится к зрительным работам III разряда подразряда «Г» (высокой точности). Согласно СП 52.13330 [4], такие помещения должны удовлетворять требованиям, указанным в таблице 31.

Таблица 31 – Требования к освещению промышленных предприятий при зрительной работе высокой точности

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Искусственное освещение		
						Освещённость, лк		
						При системе комбинированного освещения		При системе общего освещения
						Всего	В том числе от общего	
Высокой точности	От 0,3 до 0,5	III	Г	Средний большой <<	Светлый << средний	400	200	200

Освещение в помещении удовлетворяет установленным нормам. При этом количество светильников избыточно, поэтому одновременная их работа не является обязательным условием.

5.1.3 Повышенный уровень электромагнитных излучений

При работе с компьютером пользователь находится в непосредственной близости к монитору, что вызывает воздействие электромагнитных полей (ЭМП). Вредное влияние переменных магнитных полей должно быть учтено при организации рабочего места с персональными электронно-вычислительными машинами (ПЭВМ).

Когда на человека воздействуют поля, напряженность которых выше допустимой нормы, то возникают нарушения нервной, сердечно-сосудистой системы и некоторых биологических показателей крови.

Работа проводилась на современном компьютере, где значения электромагнитного излучения малы и отвечают требованиям, которые приведены в таблице 32.

Таблица 32 – Временно допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах.

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот от 2 кГц до 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот от 2 кГц до 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

Для обеспечения нормальной деятельности пользователя с учетом норм предельно допустимой напряженности ЭМП, экран монитора должен находиться на расстоянии от 0,6 до 0,7 м, но не ближе, чем 0,5 м от глаз. В комнате метролога данное требование соблюдается.

5.1.4 Повышенный уровень шума на рабочем месте

Одной из важных характеристик производственных помещений является уровень шума. При выполнении основной работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не превышает 50 дБА.

Повышенный уровень шума неблагоприятно воздействует на организм человека в целом, так и на нервную систему и органы слуха в частности, что ведет к падению производительности труда и может привести к развитию заболеваний нервной системы и снижению слуха.

Допустимые уровни звукового давления в помещениях для персонала, осуществляющего эксплуатацию ЭВМ при разных значениях частот, приведены в таблице 33.

Таблица 33 – Допустимые уровни звука на рабочем месте

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентного звука (в дБА)
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Конструкторские бюро, программисты, лаборатории	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для снижения уровня шума, производимого персональными компьютерами рекомендуется регулярно проводить их техническое обслуживание: чистка от пыли, замена смазывающих веществ; также применяются звукопоглощающие материалы. Для снижения уровня шума с улицы рекомендуется установка герметичных стеклопакетов, а также посадка зеленых насаждений на прилегающей территории.

5.1.5 Длительность сосредоточенного наблюдения

Нервно-психические перегрузки организма работающего, связанные с напряженностью трудового процесса, в целях оценки условий труда,

разработки и принятия мероприятий по их улучшению характеризуются такими показателями, как:

- длительность сосредоточенного наблюдения;
- активное наблюдение за ходом производственного процесса;
- число производственных объектов одновременного наблюдения.

Вследствие влияния этих факторов на человека, возможно появление стрессового состояния, функционального напряжения организма при выполнении работы, а также умственного перенапряжения.

В данной диссертации проводилось снятие показаний постоянного напряжения мультиметра в 9 точках диапазона одновременно у 5 экземпляров (1 класс условий труда). Каждое измерение повторялось по 3 раза. Данные измерения проводились длительностью – 1 час. Плотность сигналов составляет 135, что соответствует средней степени напряженности (Таблица 34). Длительность всех проведенных измерений составляла по 2 часа в день (25% от 8-ми часового рабочего дня), что соответствует 1-му классу условий труда.

Таблица 34 – Классы условий труда по показателям напряженности трудового процесса

	Класс условий труда			
	Оптимальный	Допустимый	Вредный	
	Напряженность труда легкой степени	Напряженность труда средней степени	Напряженный труд	
			1 степени	2 степени
	1	2	3.1	3.2
Длительность сосредоточенного наблюдения (% времени смены)	до 25	26-50	51-75	более 75
Число производственных объектов одновременного наблюдения	до 5	6-10	11-25	более 25
Плотность сигналов за 1 час работы	до 75	76-175	176-300	более 300

Работник должен придерживаться первых двух классов условий труда (оптимального и допустимого), во избежание проблем со здоровьем и перегрузкой организма.

5.1.6 Электробезопасность

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Все электрические приборы, используемые в работе, должны подключаться к сети питания имеющей защитное заземление.

Соединять и разъединять вилки, розетки электрических соединений допускается только при выключенном сетевом выключателе.

Основными причинами поражения человека электрическим током могут быть следующие:

- непосредственное прикосновение к токоведущим частям, оказавшимся под напряжением;
- соприкосновение с конструктивными частями, оказавшимися под напряжением.

Электрический ток, проходя через организм человека, оказывает тепловое (ожоги, нагрев сосудов), механическое (разрыв тканей, сосудов при судорожных сокращениях мышц), химическое (электролиз крови), биологическое (раздражение и возбуждение живой ткани) или комбинированное воздействие.

Основными средствами и способами защиты от поражения электрическим током являются:

- недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения;
- защитное заземление, зануление или отключение;
- вывешивание предупреждающих надписей;
- контроль за состоянием изоляции электрических установок;
- использование дополнительных средств защиты.

Короткое замыкание – электрическое соединение двух точек электрической цепи с различными значениями потенциала, не предусмотренное

конструкцией устройства и нарушающее его нормальную работу. Короткое замыкание может возникать в результате нарушения изоляции токоведущих элементов или механического соприкосновения неизолированных элементов.

Для защиты от короткого замыкания принимают специальные меры:

- распараллеливание электрических цепей, то есть отключение секционных и шиносоединительных выключателей;
- понижающие трансформаторы с расщеплённой обмоткой низкого напряжения;
- плавкие предохранители и автоматические выключатели;
- устройства релейной защиты для отключения повреждённых участков цепи.

Требования электробезопасности электроустановок производственного и бытового назначения на стадиях проектирования, изготовления, монтажа, наладки, испытаний и эксплуатации, а также технические способы и средства защиты, обеспечивающие электробезопасность электроустановок различного назначения приведены в ГОСТ Р 12.1.019-2009.[8]

5.2 Экологическая безопасность

В связи с тем, что основным средством работы являются средства измерения и электрические приборы, серьёзной проблемой является электропотребление. Это влечет за собой общий рост объема потребляемой электроэнергии. Для удовлетворения потребности в электроэнергии, приходится увеличивать мощность и количество электростанций. Это приводит к нарушению экологической обстановки, так как электростанции в своей деятельности используют различные виды топлива, водные ресурсы, а также являются источником вредных выбросов в атмосферу.

Данная проблема является мировой. На сегодняшний день во многих странах внедрены альтернативные источники энергии (солнечные батареи,

энергия ветра). Еще одним способом решения данной проблемы является использование энергосберегающих систем.

К отходам, производимым в помещении, где ведутся работы по исключению погрешности, можно отнести сточные воды и бытовой мусор.

Сточные воды здания относятся к бытовым сточным водам. За их очистку отвечает городской водоканал.

Основной вид мусора – это отходы печати, бытовой мусор (в т. ч. люминисцентные лампы), неисправное электрооборудование, коробки от техники, использованная бумага. Утилизация отходов печати вместе с бытовым мусором происходит в обычном порядке.

Утилизация средств измерений и электрических приборов осуществляется непосредственно работниками предприятий, в соответствие с нормативными документами.

5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайными ситуациями в подобных помещениях могут быть пожары. Основы пожарной безопасности определены по ГОСТ 12.1.004 [9] и ГОСТ 12.1.010 [10].

Все производства по пожарной опасности подразделяются на 5 категорий: А, Б, В, Г, Д. Лаборатория, в которой выполняется работа, относится к категории В.

Производства категории В характеризуются наличием жидкости с температурой вспышки паров выше 61 °С; горючей пыли или волокон, нижний предел взрываемости которых более 65 г/м³ к объему воздуха; веществ, способных только гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом; твердых сгораемых веществ и материалов.

Причинами пожара могут быть:

- токи короткого замыкания;
- электрические перегрузки;

- выделение тепла, искрение в местах плохих контактов при соединении проводов;

- курение в неположенных местах.

Тушение горящего электрооборудования под напряжением должно осуществляться имеющимися огнетушителями ОУ-5. Чтобы предотвратить пожар в лаборатории, необходимо:

- содержать помещение в чистоте, убирать своевременно мусор. По окончании работы поводится влажная уборка всех помещений;

- работа должна проводиться только при исправном электрооборудовании;

- на видном месте должен быть вывешен план эвакуации из помещения с указанием оборудования, которое нужно эвакуировать в первую очередь;

- уходящий из помещения последним должен проверить выключены ли нагревательные приборы, электроприборы и т.д. и отключение силовой и осветительной электрической сети.

Также необходимо соблюдение организационных мероприятий:

- правильная эксплуатация приборов, установок;

- правильное содержание помещения;

- противопожарный инструктаж сотрудников аудитории;

- издание приказов по вопросам усиления ПБ;

- организация добровольных пожарных дружин, пожарно-технических комиссий;

- наличие наглядных пособий и т.п.

В случаях, когда не удастся ликвидировать пожар самостоятельно, необходимо вызвать пожарную охрану и покинуть помещение, руководствуясь планом пожарной эвакуации.

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.4.1 Эргономические требования к рабочему месту

Рабочее место для выполнения работ сидя организуют при легкой работе, не требующей свободного передвижения работающего. Конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов (сиденье, органы управления, средства отображения информации и т.д.) должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям, а также характеру работы. Конструкцией производственного оборудования и рабочего места должно быть обеспечено оптимальное положение работающего, которое достигается регулированием высоты рабочей поверхности, сиденья и пространства для ног.

В процессе работы, все используемые предметы должны находиться в зоне досягаемости. Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости приведено на рисунке 1.

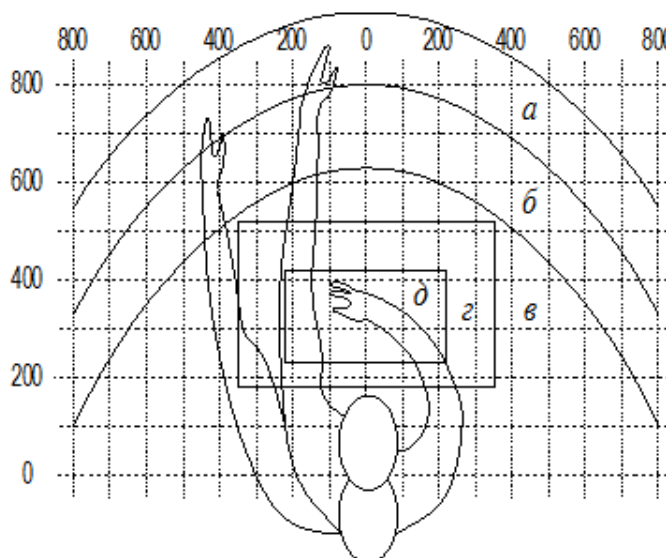


Рисунок 11 – Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости

На рисунке 11 введены следующие обозначения:

- а – зона максимальной досягаемости;
- б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;

- в – зона легкой досягаемости ладони;
- г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;
- д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

5.4.2 Особенности законодательного регулирования проектных решений

Законодательством РФ регулируются отношения между организацией и работниками, касающиеся оплаты труда, трудового распорядка, социальных отношений, особенности регулирования труда женщин, детей, людей с ограниченными способностями и др.

Продолжительность рабочего дня не должна превышать 40 часов в неделю. Для работников до 16 лет – не более 24 часов в неделю, от 16 до 18 лет – не более 35 часов, как и для инвалидов I и II группы. Для работников, работающих на местах, отнесенных к вредным условиям труда 3 и 4 степени – не более 36 часов.

Возможно установление неполных рабочих день для беременной женщины; одного из родителей (опекуна, попечителя), имеющего ребенка в возрасте до четырнадцати лет (ребенка-инвалида в возрасте до восемнадцати лет). Оплата труда при этом производится пропорционально отработанному времени. Ограничений продолжительности ежегодного основного оплачиваемого отпуска, исчисления трудового стажа и других трудовых прав при этом не имеется.

При работе в ночное время продолжительность рабочей смены на один час меньше. К работе в ночные смены не допускаются беременные женщины; работники, не достигшие возраста 18 лет; женщины, имеющие детей в возрасте до трех лет, инвалиды, работники, имеющие детей-инвалидов, а также работники, осуществляющие уход за больными членами их семей в соответствии с медицинским заключением, матери и отцы – одиночки детей до пяти лет.

Организация обязана предоставлять ежегодные отпуска продолжительностью 28 календарных дней. Для работников, занятых на работах с опасными или вредными условиями, предусматривается дополнительный отпуск.

Работнику в течение рабочего дня должен предоставляться перерыв не более двух часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается. Всем работникам предоставляются выходные дни, работа в выходные дни производится только с письменного согласия работника.

Организация выплачивает заработную плату работникам. Возможно удержание заработной платы, в случаях, предусмотренных ТК РФ ст. 137. В случае задержки заработной платы более чем на 15 дней работник имеет право приостановить работу, письменно уведомив работодателя.

Законодательством РФ запрещены дискриминация по любым признакам, а также принудительный труд [11].

Государственный надзор и контроль в организациях независимо от организационно-правовых форм и форм собственности осуществляют специально уполномоченные на то государственные органы и инспекции в соответствии с федеральными законами.

Существуют также специализированные органы, осуществляющие государственный контроль и надзор в организациях на предмет соблюдения существующих правил и норм.

К таким органам относятся:

- Федеральная инспекция труда;
- Государственная экспертиза условий труда Федеральная служба по труду и занятости населения (Минтруда России Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Госгортехнадзор, Госэнергонадзор, Госатомнадзор России));
- Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Госсанэпиднадзор России) и др.

5.5 Вывод по разделу социальная ответственность

Безопасность человека обеспечивается отсутствием недопустимого риска, связанного с причинением вреда жизни и здоровью, в процессе разнообразной жизнедеятельности, как в производственной, так и в непроизводственной сферах. В условиях лаборатории безопасность работника обеспечивается либо исключением воздействия на него опасного и вредного факторов производственной среды и трудового процесса, либо ограничением их уровней воздействия нормативными значениями. Из данной работы было выявлено, что комната инженера-метролога соответствует нормам, приведенных в нормативных документах, а также ведется контроль над отклонениями условий окружающей среды, а в случае отклонения с последующим устранением причин возникновения.

Негативное воздействие разрабатываемого объекта на окружающую среду не выявлено, т.к. разрабатываемая методика по повышению точности измерений не является материальной.

Безопасность в чрезвычайных ситуациях должна регламентироваться нормативными документами предприятия, с которыми каждый сотрудник должен быть ознакомлен.

Отношения между организацией и работником, а также нормирование рабочего дня должны производиться в соответствие с Трудовым кодексом РФ.

Заключение

В ходе работы был изучен один из способов уменьшения систематической погрешности – метод индивидуальной градуировки СИ, и реализованы его этапы в программном пакете Microsoft Excel 2010.

Проведены экспериментальные исследования внесения поправки в показания пяти экземпляров цифрового вольтметра Mastech MY-64. Результаты экспериментальных исследований были обработаны методом наименьших квадратов для определения параметров градуировочных характеристик.

Проведено внутрилабораторное исследование по оценке промежуточной прецизионности при двух одновременно изменяющихся факторах: температуре и влажности. Было выявлено, что экземпляры СИ одного типа имеют разную восприимчивость к изменению условий окружающей среды (до 5 раз). Наибольшие отклонения показаний мультиметров от среднего измеряемого значения напряжения были выявлены на нижней и верхней границах температурного диапазона от 10 до 40 °С.

Проведен анализ процедуры введения поправки для пяти экземпляров СИ одного типа с использованием параметров градуировочной прямой, рассчитанных по экспериментальным данным с помощью метода наименьших квадратов. Эксперименты показали, что в результаты измерений исследуемых экземпляров СИ целесообразно вводить поправку для повышения их точности.

Список использованных источников

- 1 Брюханов В.А. Методы повышения точности измерений в промышленности. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 108 с.
- 2 РМГ 64-2003. ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений. [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200037654> – Загл. с экрана (Дата обращения: 18.03.2018).
- 3 МИ 2175-9 ГСИ. Градуировочные характеристики средств измерений. Методы построения. Оценивание погрешностей [Электронный ресурс]. – URL: <http://meganorm.ru/Data2/1/4293768/4293768858.pdf> – Загл. с экрана (Дата обращения: 18.03.2018).
- 4 Калмановский В.И. Построение градуировочных характеристик для методик анализа объектов окружающей среды // Измерительная техника. – 1998. - № 3. – С. 64-68.
- 5 Р 50.2.028-2003. Алгоритмы построения градуировочных характеристик средств измерений состава веществ и материалов и оценивание их погрешностей (неопределенностей). – ИПК Издат-во стандартов, 2003.– 15 с.
- 6 МИ 2345-95 ГСИ. Характеристики градуировочные средств измерений состава и свойств веществ и материалов. Методика выполнения измерений с применением стандартных образцов. – УНИИМ. Екатеринбург, 1996. – 30 с.
- 7 Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. / М.:Мир,1980.456 с.
- 8 Draper N.R., Smith H. Applied Regression Analysis. 3rd Ed. / NY:Wiley & Sons. 1998. 706 pp.
- 9 Kleinbaum D.G., Kuppel L.L. and Muller K.E. Applied Regression Analysis and other multivariable Methods, PWS-Kent, Boston, MA, 1998. XVIII, 718 pp.
- 10 John R. Taylor. An Introduction to Error Analysis the study of uncertainties in physical measurements (2nd Ed.)

- 11 R.Giles- Harrison. Meteorological measurements and instrumentation – 2002. – P.20-356,
- 12 ГОСТ Р ИСО 5725-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Из-во стандартов, 2002. – 85 с.
13. Мультиметры цифровые APPA-305. Руководство по эксплуатации. URL: http://www.prist.ru/files/multimeters/appa/manual_appa-301,303,305.pdf – Загл. с экрана (Дата обращения: 15.02.2018).
- 14 Цифровые мультиметры MY60-64. Инструкция по эксплуатации. URL: http://micromir-nn.ru/Manual/my60_64_new_rus.pdf – Загл. с экрана (Дата обращения: 15.02.2018).
- 15 Камера для испытаний на воздействие факторов окружающей среды серии AR. Руководство пользователя/ Основные операции. URL: <http://www.espec.com/na/products/benchtops/> – Загл. с экрана (Дата обращения: 21.02.2018).
- 16 ГОСТ Р 8.736-2011 ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200089016> – Загл. с экрана (Дата обращения: 18.03.2018)
- 17 Семенов Л.А., Сирая Т.Н. Методы построения градуировочных характеристик средств измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 128 с.
- 18 Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология: Учеб. пособие для вузов. – М.: Логос, 2001. – 408 с.
- 19 Емельянов А.В., Шилин А.Н. Расчет погрешностей электрических измерений: Метод. указания и задания. – Волгоград: ВолгГТУ, 2002. – 30 с.
- 20 Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.

- 21 ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 9 с.
- 22 ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2016. – 16 с.
- 23 Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Минздрав России, 1997. – 20 с.
- 24 Свод правил: СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение. – М.: Минрегион России, 2011. – 74 с.
- 25 Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях. – М.: Госкомсанэпиднадзор, 2009.
- 26 Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.2.4.3359-16 Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. – утв. Главным государственным санитарным врачом РФ, 2016. – 35 с.
- 27 Р 2.2.2006-05 Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. – утв. Гл. государственным санитарным врачом РФ, 2005. – 65 с.
- 28 ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – М.: Стандартинформ, 2010. – 27 с.
- 29 ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9051953>. – Загл. с экрана (Дата обращения: 23.04.2018).
- 30 ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-12-1-010-76-ssbt>. – Загл. с экрана (Дата обращения: 23.04.2018).
- 31 Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ. [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/. – Загл. с экрана (Дата обращения: 23.04.2018).

Приложение А (обязательное)

Результаты вычислений коэффициентов регрессии для исследуемых экземпляров мультиметров

Таблица А.1 – Результаты промежуточных вычислений и оценок коэффициентов a и b по методу наименьших квадратов для ЦМ1

$t, ^\circ\text{C}$	X_N, B	i	X_i, B	n_i	\bar{y}_i, B	$S_i^2 \cdot 10^{-7}, \text{B}^2$	ω_i, B^{-2}	$\omega_i X_i, \text{B}^{-1}$	$\omega_i \bar{y}_i, \text{B}^{-1}$	$\omega_i (X_i - \bar{X}), \text{B}^{-1}$	$\omega_i (X_i - \bar{X})^2$	$\omega_i \bar{y}_i (X_i - \bar{X})$		
10	2	1	0,6	3	0,602	15,43	0,1944	0,1166	0,1171	-0,2409	0,2984	-0,1451		
		2	1		1,002	0,23	12,8571	12,8571	12,8863	-10,7880	9,0519	-10,8125		
		3	1,6		1,603	0,43	6,9231	11,0769	11,1009	-1,6551	0,3957	-2,6539		
		4	1,98		1,984	0,03	90,0000	178,2000	178,5270	12,6839	1,7876	25,1603		
		Суммы					109,9746	202,2507	202,6313		11,5336	11,5489		
	$\bar{X} = 1,8391 \text{ B}$					$\bar{y} = 1,8425 \text{ B}$					$b = 1,0013$		$a = 0,0010$	
	20	1	2	3	2,00	88,2333	0,0340	0,0680	0,0680	-0,4478	5,8973	-0,8956		
		2	6		6,01	70,0000	0,0429	0,2571	0,2574	-0,3930	3,6038	-2,3603		
		3	10		10,02	40,0000	0,0750	0,7500	0,7511	-0,3877	2,0046	-3,8833		
		4	16		16,02	13,3333	0,2250	3,6000	3,6053	0,1868	0,1550	2,9927		
5		19,8	19,83		13,3333	0,2250	4,4550	4,4608	1,0418	4,8234	20,6537			
Суммы					0,6019	9,1301	9,1426		16,4842	16,5072				
$\bar{X} = 15,1699 \text{ B}$					$\bar{y} = 15,1907 \text{ B}$					$b = 1,0014$		$a = -0,0004$		
20	2	1	0,6	3	0,600	0,03	90,0000	54,0000	54,0210	-11,4142	1,4476	-6,8512		
		2	1		1,001	0,10	30,0000	30,0000	30,0150	8,1953	2,2387	8,1994		
		3	1,6		1,601	1,23	2,4324	3,8919	3,8939	2,1239	1,8546	3,4001		
		4	1,98		1,980	3,43	0,8738	1,7301	1,7303	1,0950	1,3722	2,1684		
		Суммы					123,3062	89,6220	89,6602		6,9132	6,9166		
	$\bar{X} = 0,7268 \text{ B}$					$\bar{y} = 0,7271 \text{ B}$					$b = 1,0005$		$a = -0,0001$	
	20	1	2	3	1,99	6,53	0,4592	0,9184	0,9156	-1,8385	7,3613	-3,6661		
		2	6		6,00	143,33	0,0209	0,1256	0,1256	-0,0001	0,0000	-0,0005		
		3	10		10,01	25,83	0,1161	1,1613	1,1621	0,4641	1,8544	4,6440		
		4	16		16,00	23,33	0,1286	2,0571	2,0575	1,2852	12,8471	20,5668		
5		19,8	19,80		463,33	0,0065	0,1282	0,1282	0,0893	1,2324	1,7687			
Суммы					0,7313	4,3906	4,3891		23,2952	23,3129				
$\bar{X} = 6,0039 \text{ B}$					$\bar{y} = 6,0018 \text{ B}$					$b = 1,0008$		$a = -0,0067$		
30	2	1	0,6	3	0,599	1,73	1,7308	1,0385	1,0375	-1,6993	1,6684	-1,0187		
		2	1		0,999	6,53	0,4592	0,4592	0,4589	-0,2672	0,1554	-0,2670		
		3	1,6		1,599	0,03	90,0000	144,0000	143,8890	1,6376	0,0298	2,6182		
		4	1,98		1,977	3,63	0,8257	1,6349	1,6327	0,3288	0,1309	0,6502		
		Суммы					93,0156	147,1325	147,0182		1,9845	1,9827		
	$\bar{X} = 1,5818 \text{ B}$					$\bar{y} = 1,5806 \text{ B}$					$b = 0,9991$		$a = 0,0002$	
	20	1	2	3	2,00	235,20	0,0128	0,0255	0,0255	-0,1074	0,9036	-0,2142		
		2	6		6,00	10,00	0,3000	1,8000	1,7994	-1,3250	5,8519	-7,9472		
		3	10		10,00	93,33	0,0321	0,3214	0,3215	-0,0134	0,0056	-0,1339		
		4	16		16,00	70,00	0,0429	0,6857	0,6856	0,2393	1,3360	3,8279		
5		19,8	19,79		23,33	0,1286	2,5457	2,5442	1,2064	11,3205	23,8734			
Суммы					0,5163	5,3784	5,3761		19,4176	19,4059				
$\bar{X} = 10,4166 \text{ B}$					$\bar{y} = 10,4123 \text{ B}$					$b = 0,9994$		$a = 0,0019$		
40	2	1	0,6	3	0,602	317,50	0,0094	0,0057	0,0057	-0,0070	0,0052	-0,0042		
		2	1		0,997	0,13	22,5000	22,5000	22,4378	-7,7667	2,6810	-7,7452		
		3	1,6		1,596	0,13	22,5000	36,0000	35,9063	5,7333	1,4609	9,1494		
		4	1,98		1,974	0,93	3,2143	6,3643	6,3457	2,0405	1,2953	4,0284		
		Суммы					48,2237	64,8700	64,6954		5,4424	5,4283		
	$\bar{X} = 1,3452 \text{ B}$					$\bar{y} = 1,3416 \text{ B}$					$b = 0,9974$		$a = -0,0001$	
	20	1	2	3	1,99	83,33	0,0360	0,0720	0,0718	-0,3382	3,1763	-0,6745		
		2	6		6,00	43,33	0,0692	0,4154	0,4152	-0,3734	2,0136	-2,2392		
		3	10		9,99	3,33	0,9000	9,0000	8,9922	-1,2538	1,7466	-12,5267		
		4	16		15,98	187,50	0,0160	0,2560	0,2557	0,0737	0,3396	1,1780		
5		19,8	19,77		13,33	0,2250	4,4550	4,4486	1,8916	15,9022	37,3993			
Суммы					1,2462	14,1984	14,1835		23,1782	23,1369				
$\bar{X} = 11,3931 \text{ B}$					$\bar{y} = 11,3811 \text{ B}$					$b = 0,9982$		$a = 0,0084$		

Таблица А.2 – Результаты промежуточных вычислений и оценок коэффициентов a и b по методу наименьших квадратов для ЦМ2

$t, ^\circ\text{C}$	$X_N, \text{В}$	i	$X_i, \text{В}$	n_i	$\bar{y}_i, \text{В}$	$S_i^2 \cdot 10^{-7}, \text{В}^2$	$\omega_i, \text{В}^{-2}$	$\omega_i \cdot X_i, \text{В}^{-1}$	$\omega_i \cdot \bar{y}_i, \text{В}^{-1}$	$\omega_i \cdot (X_i - \bar{X}), \text{В}^{-1}$	$\omega_i \cdot (X_i - \bar{X})^2$	$\omega_i \cdot \bar{y}_i \cdot (X_i - \bar{X})$		
10	2	1	0,6	3	0,601	128,10	0,0234	0,0141	0,0141	-0,0269	0,0308	-0,0162		
		2	1		0,998	2,23	1,3433	1,3433	1,3403	-1,0041	0,7506	-1,0019		
		3	1,6		1,596	1,60	1,8750	3,0000	2,9931	-0,2766	0,0408	-0,4416		
		4	1,98		1,975	0,53	5,6250	11,1375	11,1092	1,3076	0,3040	2,5825		
		Суммы					8,8667	15,4948	15,4566		1,1263	1,1229		
	$\bar{X} = 1,7475 \text{ В}$					$\bar{y} = 1,7432 \text{ В}$					$b = 0,9970$		$a = 0,0009$	
	20	1	2	3	1,99	553,23	0,0054	0,0108	0,0108	-0,0483	0,4304	-0,0964		
		2	6		5,98	53,33	0,0562	0,3375	0,3363	-0,2761	1,3556	-1,6511		
		3	10		9,97	123,33	0,0243	0,2432	0,2425	-0,0221	0,0201	-0,2205		
		4	16		15,94	83,33	0,0360	0,5760	0,5740	0,1833	0,9330	2,9222		
5		19,8	19,73		163,33	0,0184	0,3637	0,3624	0,1633	1,4519	3,2220			
Суммы					0,1404	1,5313	1,5260		4,1910	4,1762				
$\bar{X} = 10,9092 \text{ В}$					$\bar{y} = 10,8720 \text{ В}$					$b = 0,9965$		$a = 0,0013$		
20	2	1	0,6	3	0,599	1,03	2,9032	1,7419	1,7392	-1,2388	0,5286	-0,7421		
		2	1		0,999	0,10	30,0000	30,0000	29,9550	-0,8008	0,0214	-0,7996		
		3	1,6		1,597	1,23	2,4324	3,8919	3,8850	1,3945	0,7995	2,2273		
		4	1,98		1,976	4,43	0,6767	1,3398	1,3368	0,6451	0,6150	1,2744		
		Суммы					36,0123	36,9737	36,9161		1,9644	1,9600		
	$\bar{X} = 1,0267 \text{ В}$					$\bar{y} = 1,0251 \text{ В}$					$b = 0,9977$		$a = 0,0007$	
	20	1	2	3	1,99	6,53	0,4592	0,9184	0,9156	-1,3616	4,0374	-2,7151		
		2	6		5,98	10,00	0,3000	1,8000	1,7937	0,3104	0,3212	1,8561		
		3	10		9,97	125,83	0,0238	0,2384	0,2377	0,1200	0,6043	1,1970		
		4	16		15,95	40,00	0,0750	1,2000	1,1960	0,8276	9,1325	13,1971		
5		19,8	19,73		430,00	0,0070	0,1381	0,1376	0,1035	1,5354	2,0419			
Суммы					0,8650	4,2949	4,2807		15,6308	15,5770				
$\bar{X} = 4,9652 \text{ В}$					$\bar{y} = 4,9488 \text{ В}$					$b = 0,9966$		$a = 0,0006$		
30	2	1	0,6	3	0,599	1,23	2,4324	1,4595	1,4569	-2,3741	2,3171	-1,4220		
		2	1		0,998	14,53	0,2064	0,2064	0,2060	-0,1189	0,0685	-0,1187		
		3	1,6		1,597	0,03	90,0000	144,0000	143,7090	2,1594	0,0518	3,4481		
		4	1,98		1,975	3,63	0,8257	1,6349	1,6311	0,3336	0,1348	0,6590		
		Суммы					93,4645	147,3007	147,0031		2,5722	2,5663		
	$\bar{X} = 1,5760 \text{ В}$					$\bar{y} = 1,5728 \text{ В}$					$b = 0,9977$		$a = 0,0004$	
	20	1	2	3	1,99	128,53	0,0233	0,0467	0,0465	-0,1840	1,4512	-0,3666		
		2	6		5,99	43,33	0,0692	0,4154	0,4144	-0,2690	1,0451	-1,6102		
		3	10		9,98	10,00	0,3000	3,0000	2,9934	0,0344	0,0039	0,3434		
		4	16		15,96	70,00	0,0429	0,6857	0,6839	0,2621	1,6024	4,1817		
5		19,8	19,75		190,00	0,0158	0,3126	0,3118	0,1565	1,5521	3,0910			
Суммы					0,4512	4,4604	4,4500		5,6548	5,6393				
$\bar{X} = 9,8853 \text{ В}$					$\bar{y} = 9,8621 \text{ В}$					$b = 0,9973$		$a = 0,0040$		
40	2	1	0,6	3	0,600	7,50	0,4000	0,2400	0,2398	-0,3138	0,2463	-0,1882		
		2	1		1,000	0,13	22,5000	22,5000	22,5053	-8,6540	3,3285	-8,6560		
		3	1,6		1,601	0,13	22,5000	36,0000	36,0188	4,8460	1,0437	7,7576		
		4	1,98		1,981	0,43	6,9231	13,7077	13,7116	4,1218	2,4541	8,1636		
		Суммы					52,3231	72,4477	72,4755		7,0725	7,0770		
	$\bar{X} = 1,3846 \text{ В}$					$\bar{y} = 1,3852 \text{ В}$					$b = 1,0006$		$a = -0,0003$	
	20	1	2	3	2,00	83,33	0,0360	0,0720	0,0720	-0,2495	1,7287	-0,4993		
		2	6		6,00	10,00	0,3000	1,8000	1,7997	-0,8789	2,5747	-5,2724		
		3	10		10,00	3,33	0,9000	9,0000	9,0012	0,9634	1,0312	9,6351		
		4	16		16,00	437,50	0,0069	0,1097	0,1097	0,0485	0,3428	0,7756		
5		19,8	19,79		280,00	0,0107	0,2121	0,2120	0,1165	1,2661	2,3049			
Суммы					1,2536	11,1939	11,1947		6,9435	6,9440				
$\bar{X} = 8,9296 \text{ В}$					$\bar{y} = 8,9302 \text{ В}$					$b = 1,0001$		$a = 0,0000$		

Таблица А.3 – Результаты промежуточных вычислений и оценок коэффициентов a и b по методу наименьших квадратов для ЦМЗ

$t, ^\circ\text{C}$	X_N, B	i	X_i, B	n_i	\bar{y}_i, B	$S_i^2 \cdot 10^{-7}, \text{B}^2$	ω_i, B^{-2}	$\omega_i \cdot X_i, \text{B}^{-1}$	$\omega_i \cdot \bar{y}_i, \text{B}^{-1}$	$\frac{\omega_i \cdot (X_i - \bar{X})}{\bar{X}}, \text{B}^{-1}$	$\frac{\omega_i}{(X_i - \bar{X})^2}$	$\frac{\omega_i \cdot \bar{y}_i}{(X_i - \bar{X})}$		
10	2	1	0,6	3	0,606	492,10	0,0061	0,0037	0,0037	-0,0043	0,0030	-0,0026		
		2	1		1,002	0,23	12,8571	12,8571	12,8863	-3,9324	1,2028	-3,9413		
		3	1,6		1,604	6,10	0,4918	0,7869	0,7888	0,1447	0,0426	0,2320		
		4	1,98		1,984	0,53	5,6250	11,1375	11,1598	3,7921	2,5564	7,5233		
		Суммы					18,9800	24,7852	24,8385		3,8047	3,8114		
	$\bar{X} = 1,3059 \text{ B}$					$\bar{y} = 1,3087 \text{ B}$					$b = 1,0017$			$a = 0,0005$
	20	1	2	3	2,01	289,90	0,0103	0,0207	0,0208	-0,1244	1,4944	-0,2497		
		2	6		6,01	1003,33	0,0030	0,0179	0,0180	-0,0240	0,1922	-0,1441		
		3	10		10,02	123,33	0,0243	0,2432	0,2437	-0,0977	0,3925	-0,9789		
		4	16		16,02	30,00	0,1000	1,6000	1,6024	0,1983	0,3932	3,1774		
5		19,8	19,83		363,33	0,0083	0,1635	0,1637	0,0477	0,2761	0,9469			
Суммы					0,1459	2,0454	2,0486		2,7484	2,7516				
$\bar{X} = 14,0171 \text{ B}$					$\bar{y} = 14,0391 \text{ B}$					$b = 1,0012$			$a = 0,0058$	
20	2	1	0,6	3	0,600	0,70	4,2857	2,5714	2,5731	-2,4891	1,4456	-1,4944		
		2	1		1,001	0,93	3,2143	3,2143	3,2164	-0,5811	0,1051	-0,5815		
		3	1,6		1,601	0,90	3,3333	5,3333	5,3350	1,3974	0,5858	2,2365		
		4	1,98		1,981	1,43	2,0930	4,1442	4,1454	1,6728	1,3369	3,3130		
		Суммы					12,9264	15,2632	15,2699		3,4734	3,4736		
	$\bar{X} = 1,1808 \text{ B}$					$\bar{y} = 1,1813 \text{ B}$					$b = 1,0001$			$a = 0,0004$
	20	1	2	3	2,00	53,20	0,0564	0,1128	0,1129	-0,3227	1,8467	-0,6462		
		2	6		6,00	10,00	0,3000	1,8000	1,7997	-0,5168	0,8902	-3,1001		
		3	10		9,99	50,83	0,0590	0,5902	0,5898	0,1344	0,3061	1,3432		
		4	16		15,99	40,00	0,0750	1,2000	1,1990	0,6208	5,1387	9,9242		
5		19,8	19,77		430,00	0,0070	0,1381	0,1380	0,0843	1,0177	1,6662			
Суммы					0,4974	3,8411	3,8393		9,1993	9,1873				
$\bar{X} = 7,7226 \text{ B}$					$\bar{y} = 7,7190 \text{ B}$					$b = 0,9987$			$a = 0,0065$	
30	2	1	0,6	3	0,599	0,90	3,3333	2,0000	1,9977	-1,9414	1,1307	-1,1635		
		2	1		0,999	14,53	0,2064	0,2064	0,2062	-0,0377	0,0069	-0,0376		
		3	1,6		1,599	0,70	4,2857	6,8571	6,8511	1,7896	0,7473	2,8609		
		4	1,98		1,978	12,63	0,2375	0,4702	0,4697	0,1894	0,1511	0,3746		
		Суммы					8,0629	9,5337	9,5247		2,0360	2,0344		
	$\bar{X} = 1,1824 \text{ B}$					$\bar{y} = 1,1813 \text{ B}$					$b = 0,9992$			$a = -0,0002$
	20	1	2	3	2,00	48,53	0,0618	0,1236	0,1235	-0,3187	1,6433	-0,6370		
		2	6		5,99	10,00	0,3000	1,8000	1,7964	-0,3468	0,4009	-2,0767		
		3	10		9,98	43,33	0,0692	0,6923	0,6909	0,1969	0,5599	1,9649		
		4	16		15,96	70,00	0,0429	0,6857	0,6839	0,3790	3,3521	6,0481		
5		19,8	19,74		423,33	0,0071	0,1403	0,1399	0,0896	1,1329	1,7691			
Суммы					0,4810	3,4420	3,4346		7,0892	7,0684				
$\bar{X} = 7,1560 \text{ B}$					$\bar{y} = 7,1408 \text{ B}$					$b = 0,9971$			$a = 0,0058$	
40	2	1	0,6	3	0,599	0,83	3,6000	2,1600	2,1574	-3,1047	2,6775	-1,8605		
		2	1		0,995	346,80	0,0087	0,0087	0,0086	-0,0040	0,0018	-0,0040		
		3	1,6		1,598	0,13	22,5000	36,0000	35,9513	3,0958	0,4259	4,9465		
		4	1,98		1,975	120,10	0,0250	0,0495	0,0493	0,0129	0,0067	0,0255		
		Суммы					26,1336	38,2181	38,1665		3,1120	3,1075		
	$\bar{X} = 1,4624 \text{ B}$					$\bar{y} = 1,4604 \text{ B}$					$b = 0,9986$			$a = 0,0001$
	20	1	2	3	1,99	83,33	0,0360	0,0720	0,0718	-0,2155	1,2895	-0,4298		
		2	6		5,98	10,00	0,3000	1,8000	1,7937	-0,5955	1,1819	-3,5602		
		3	10		9,96	70,00	0,0429	0,4286	0,4270	0,0864	0,1740	0,8604		
		4	16		15,94	145,83	0,0206	0,3291	0,3279	0,1649	1,3216	2,6279		
5		19,8	19,72		63,33	0,0474	0,9379	0,9340	0,5597	6,6125	11,0357			
Суммы					0,4468	3,5676	3,5544		10,5795	10,5340				
$\bar{X} = 7,9849 \text{ B}$					$\bar{y} = 7,9553 \text{ B}$					$b = 0,9957$			$a = 0,0047$	

Таблица А.4 – Результаты промежуточных вычислений и оценок коэффициентов a и b по методу наименьших квадратов для ЦМ4

$t, ^\circ\text{C}$	X_N, B	i	X_i, B	n_i	\bar{y}_i, B	$S_i^2 \cdot 10^{-7}, \text{B}^2$	ω_i, B^{-2}	$\omega_i \cdot X_i, \text{B}^{-1}$	$\omega_i \cdot \bar{y}_i, \text{B}^{-1}$	$\omega_i \cdot (X_i - \bar{X}), \text{B}^{-1}$	$\omega_i \cdot (X_i - \bar{X})^2$	$\omega_i \cdot \bar{y}_i \cdot (X_i - \bar{X})$				
10	2	1	0,6	3	0,607	765,10	0,0039	0,0024	0,0024	-0,0026	0,0017	-0,0016				
		2	1		1,002	0,23	12,8571	12,8571	12,8884	-3,2754	0,8344	-3,2834				
		3	1,6		1,604	6,10	0,4918	0,7869	0,7888	0,1698	0,0586	0,2723				
		4	1,98		1,984	0,70	4,2857	8,4857	8,5020	3,1082	2,2542	6,1660				
		Суммы						17,6386	22,1321	22,1816		3,1489	3,1534			
	$\bar{X} = 1,2548 \text{ B}$						$\bar{y} = 1,2576 \text{ B}$						$b = 1,0014$		$a = 0,0010$	
	20	1	2	3	2,00	553,23	0,0054	0,0108	0,0109	-0,0244	0,1098	-0,0489				
		2	6		6,02	3,33	0,9000	5,4000	5,4159	-0,4507	0,2257	-2,7121				
		3	10		10,03	223,33	0,0134	0,1343	0,1347	0,0470	0,1645	0,4713				
		4	16		16,03	83,33	0,0360	0,5760	0,5772	0,3420	3,2485	5,4834				
5		19,8	19,84		463,33	0,0065	0,1282	0,1285	0,0861	1,1452	1,7086					
Суммы						0,9613	6,2494	6,2672		4,8937	4,9024					
$\bar{X} = 6,5008 \text{ B}$						$\bar{y} = 6,5193 \text{ B}$						$b = 1,0018$		$a = 0,0070$		
20	2	1	0,6	3	0,601	0,70	4,2857	2,5714	2,5774	-2,3232	1,2594	-1,3972				
		2	1		1,004	0,10	30,0000	30,0000	30,1050	-4,2625	0,6056	-4,2774				
		3	1,6		1,605	0,23	12,8571	20,5714	20,6314	5,8875	2,6960	9,4475				
		4	1,98		1,985	3,60	0,8333	1,6500	1,6545	0,6983	0,5851	1,3863				
		Суммы						47,9762	54,7929	54,9684		5,1461	5,1592			
	$\bar{X} = 1,1421 \text{ B}$						$\bar{y} = 1,1457 \text{ B}$						$b = 1,0025$		$a = 0,0008$	
	20	1	2	3	2,00	6,53	0,4592	0,9184	0,9202	-1,1060	2,6640	-2,2165				
		2	6		6,02	10,00	0,3000	1,8000	1,8057	0,4774	0,7597	2,8735				
		3	10		10,03	142,50	0,0211	0,2105	0,2111	0,1177	0,6582	1,1801				
		4	16		16,04	223,33	0,0134	0,2149	0,2154	0,1557	1,8048	2,4971				
5		19,8	19,84		130,00	0,0231	0,4569	0,4578	0,3552	5,4668	7,0465					
Суммы						0,8167	3,6007	3,6103		11,3535	11,3808					
$\bar{X} = 4,4086 \text{ B}$						$\bar{y} = 4,4203 \text{ B}$						$b = 1,0024$		$a = 0,0010$		
30	2	1	0,6	3	0,602	4,23	0,7087	0,4252	0,4264	-0,4398	0,2730	-0,2646				
		2	1		1,003	29,20	0,1027	0,1027	0,1030	-0,0227	0,0050	-0,0227				
		3	1,6		1,604	4,03	0,7438	1,1901	1,1934	0,2822	0,1070	0,4527				
		4	1,98		1,985	12,63	0,2375	0,4702	0,4713	0,1803	0,1369	0,3579				
		Суммы						1,7927	2,1882	2,1941		0,5219	0,5233			
	$\bar{X} = 1,2206 \text{ B}$						$\bar{y} = 1,2239 \text{ B}$						$b = 1,0025$		$a = 0,0002$	
	20	1	2	3	2,00	128,53	0,0233	0,0467	0,0467	-0,2742	3,2206	-0,5489				
		2	6		6,02	43,33	0,0692	0,4154	0,4165	-0,5363	4,1546	-3,2266				
		3	10		10,01	10643,33	0,0003	0,0028	0,0028	-0,0011	0,0040	-0,0106				
		4	16		16,04	203,33	0,0148	0,2361	0,2367	0,0332	0,0749	0,5334				
5		19,8	19,85		23,33	0,1286	2,5457	2,5519	0,7783	4,7112	15,4477					
Суммы						0,2362	3,2467	3,2547		12,1653	12,1950					
$\bar{X} = 13,7467 \text{ B}$						$\bar{y} = 13,7807 \text{ B}$						$b = 1,0024$		$a = 0,0004$		
40	2	1	0,6	3	0,603	2,50	1,2000	0,7200	0,7231	-0,4580	0,1748	-0,2760				
		2	1		0,998	0,13	22,5000	22,5000	22,4603	0,4119	0,0075	0,4112				
		3	1,6		1,604	104,63	0,0287	0,0459	0,0460	0,0177	0,0110	0,0284				
		4	1,98		1,985	105,43	0,0285	0,0563	0,0565	0,0284	0,0284	0,0564				
		Суммы						23,7571	23,3222	23,2858		0,2217	0,2200			
	$\bar{X} = 0,9817 \text{ B}$						$\bar{y} = 0,9802 \text{ B}$						$b = 0,9923$		$a = 0,0060$	
	20	1	2	3	2,01	83,33	0,0360	0,0720	0,0724	-0,1292	0,4635	-0,2598				
		2	6		6,03	10,00	0,3000	1,8000	1,8087	0,1236	0,0509	0,7451				
		3	10		10,03	12403,33	0,0002	0,0024	0,0024	0,0011	0,0047	0,0107				
		4	16		16,03	10687,50	0,0003	0,0045	0,0045	0,0029	0,0304	0,0468				
5		19,8	19,83		26763,33	0,0001	0,0022	0,0022	0,0016	0,0226	0,0316					
Суммы						0,3366	1,8811	1,8903		0,5722	0,5744					
$\bar{X} = 5,5880 \text{ B}$						$\bar{y} = 5,6152 \text{ B}$						$b = 1,0040$		$a = 0,0050$		

Таблица А.5 – Результаты промежуточных вычислений и оценок коэффициентов a и b по методу наименьших квадратов для ЦМ5

$t, ^\circ\text{C}$	X_N, B	i	X_i, B	n_i	\bar{y}_i, B	$S_i^2 \cdot 10^{-7}, \text{B}^2$	ω_i, B^{-2}	$\omega_i \cdot X_i, \text{B}^{-1}$	$\omega_i \cdot \bar{y}_i, \text{B}^{-1}$	$\omega_i \cdot (X_i - \bar{X}), \text{B}^{-1}$	$\omega_i \cdot (X_i - \bar{X})^2$	$\omega_i \cdot \bar{y}_i \cdot (X_i - \bar{X})$		
10	2	1	0,6	3	0,604	765,10	0,0039	0,0024	0,0024	-0,0041	0,0042	-0,0025		
		2	1		0,997	3,23	0,9278	0,9278	0,9250	-0,5916	0,3772	-0,5898		
		3	1,6		1,595	0,43	6,9231	11,0769	11,0455	-0,2603	0,0098	-0,4154		
		4	1,98		1,974	1,20	2,5000	4,9500	4,9357	0,8560	0,2931	1,6900		
		Суммы					10,3548	16,9571	16,9086		0,6843	0,6824		
		$\bar{X} = 1,6376 \text{ B}$					$\bar{y} = 1,6329 \text{ B}$					$b = 0,9972$		$a = -0,0001$
	20	1	2	3	1,99	553,23	0,0054	0,0108	0,0108	-0,0647	0,7727	-0,1291		
		2	6		5,98	370,00	0,0081	0,0486	0,0485	-0,0644	0,5108	-0,3849		
		3	10		9,97	223,33	0,0134	0,1343	0,1339	-0,0529	0,2082	-0,5271		
		4	16		15,94	83,33	0,0360	0,5760	0,5740	0,0743	0,1532	1,1843		
5		19,8	19,73	163,33	0,0184	0,3637	0,3624	0,1077	0,6314	2,1248				
Суммы					0,0813	1,1335	1,1296		2,2763	2,2680				
$\bar{X} = 13,9368 \text{ B}$					$\bar{y} = 13,8889 \text{ B}$					$b = 0,9964$		$a = 0,0027$		
20	2	1	0,6	3	0,598	0,70	4,2857	2,5714	2,5646	-2,3115	1,2467	-1,3832		
		2	1		0,999	0,10	30,0000	30,0000	29,9550	-4,1802	0,5825	-4,1739		
		3	1,6		1,597	0,23	12,8571	20,5714	20,5307	5,9228	2,7284	9,4577		
		4	1,98		1,976	4,43	0,6767	1,3398	1,3368	0,5689	0,4782	1,1238		
		Суммы					47,8195	54,4827	54,3871		5,0357	5,0244		
		$\bar{X} = 1,1393 \text{ B}$					$\bar{y} = 1,1373 \text{ B}$					$b = 0,9978$		$a = 0,0006$
	20	1	2	3	1,99	6,53	0,4592	0,9184	0,9156	-1,7962	7,0266	-3,5818		
		2	6		5,99	93,33	0,0321	0,1929	0,1924	0,0028	0,0002	0,0170		
		3	10		9,97	50,83	0,0590	0,5902	0,5886	0,2413	0,9864	2,4064		
		4	16		15,95	23,33	0,1286	2,0571	2,0513	1,2971	13,0849	20,6936		
5		19,8	19,73	163,33	0,0184	0,3637	0,3624	0,2551	3,5427	5,0335				
Суммы					0,6973	4,1222	4,1104		24,6408	24,5686				
$\bar{X} = 5,9118 \text{ B}$					$\bar{y} = 5,8948 \text{ B}$					$b = 0,9971$		$a = 0,0003$		
30	2	1	0,6	3	0,600	4,23	0,7087	0,4252	0,4249	-0,4427	0,2766	-0,2655		
		2	1		0,999	29,20	0,1027	0,1027	0,1026	-0,0231	0,0052	-0,0231		
		3	1,6		1,598	4,03	0,7438	1,1901	1,1889	0,2791	0,1047	0,4461		
		4	1,98		1,977	12,13	0,2473	0,4896	0,4888	0,1867	0,1410	0,3692		
		Суммы					1,8025	2,2076	2,2053		0,5276	0,5267		
		$\bar{X} = 1,2248 \text{ B}$					$\bar{y} = 1,2235 \text{ B}$					$b = 0,9985$		$a = 0,0006$
	20	1	2	3	1,99	128,53	0,0233	0,0467	0,0465	-0,1847	1,4624	-0,3680		
		2	6		5,99	143,33	0,0209	0,1256	0,1254	-0,0820	0,3209	-0,4909		
		3	10		9,99	43,33	0,0692	0,6923	0,6916	0,0059	0,0005	0,0585		
		4	16		15,97	203,33	0,0148	0,2361	0,2357	0,0898	0,5462	1,4340		
5		19,8	19,76	173,33	0,0173	0,3427	0,3421	0,1711	1,6910	3,3811				
Суммы					0,1456	1,4433	1,4412		4,0210	4,0146				
$\bar{X} = 9,9155 \text{ B}$					$\bar{y} = 9,9008 \text{ B}$					$b = 0,9984$		$a = 0,0010$		
40	2	1	0,6	3	0,600	0,83	3,6000	2,1600	2,1610	-3,2987	3,0226	-1,9801		
		2	1		1,000	20,63	0,1454	0,1454	0,1454	-0,0751	0,0388	-0,0750		
		3	1,6		1,601	0,13	22,5000	36,0000	36,0188	1,8833	0,1576	3,0148		
		4	1,98		1,981	0,93	3,2143	6,3643	6,3682	1,4905	0,6911	2,9530		
		Суммы					29,4597	44,6697	44,6933		3,9101	3,9126		
		$\bar{X} = 1,5163 \text{ B}$					$\bar{y} = 1,5171 \text{ B}$					$b = 1,0007$		$a = -0,0002$
	20	1	2	3	1,99	83,33	0,0360	0,0720	0,0718	-0,2781	2,1486	-0,5548		
		2	6		6,01	2543,33	0,0012	0,0071	0,0071	-0,0044	0,0164	-0,0264		
		3	10		10,00	70,00	0,0429	0,4286	0,4287	0,0118	0,0032	0,1177		
		4	16		16,00	145,83	0,0206	0,3291	0,3291	0,1291	0,8099	2,0650		
5		19,8	19,79	213,33	0,0141	0,2784	0,2783	0,1417	1,4273	2,8042				
Суммы					0,1147	1,1152	1,1150		4,4054	4,4057				
$\bar{X} = 9,7255 \text{ B}$					$\bar{y} = 9,7239 \text{ B}$					$b = 1,0001$		$a = -0,0022$		

Приложение Б
(обязательное)

1.2 Calibration curve of measuring instruments

1.2.1. The problem of constructing the calibration curve of SI

1.2.2 Procedure for constructing a calibration curve

1.2.3 Methods for constructing a calibration curve

1.2.4. Regression analysis. Least square method

1.3 Combining separate measurements

1.3.1. The best estimate of a set of measurements

1.3.2 The weighted average

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ61	Власова М.В.		

Консультант школы отделения (НОЦ):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОАР	Муравьев С.В.	Доктор техн. наук, профессор		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Кузнецова И.Н.			

1.2 Calibration curve of measuring instruments

The calibration curve (CC) of a measuring instrument (the measuring converter or the device) is understood as the functional dependence between the input and output values, constructed on the basis of the results of measuring the input and corresponding output values at m points of the range (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, m$.

$$Y = f(X). \quad (1)$$

The calibration curve can be represented by:

- a table;
- a graph (drawn with or without smoothing);
- a formula (in the analytical form).

There are individual CC built on specific SI specimens, and typical CC built for a group of the same type of SI.

The error CC $Y = f(X)$ at the point X is defined as the difference between the value of CC at the point X and the true value of Y at the point X .

$$\Delta(X) = f(X) - Y. \quad (2)$$

The following characteristics of errors may be estimated:

- $\Delta(X)$ are the CC gross error bounds in the point of X ;
- Δ are the CC error bounds on all range of change of X ;
- $S(X)$ and $\theta(X)$ are the measurements uncertainty RMS and the systematic components error bounds in CC at the point X ;
- $\varepsilon(X)$ and $\theta(X)$ are random and systematic components error bounds of the CC at the point X .

When specifying the confidence limits of the random error $\varepsilon(X)$, and also the bounds $\Delta(X)$ and $\theta(X)$, if they are obtained by statistical methods it is necessary to indicate the confidence probability P . Usually (unless otherwise stated) it is recommended to take $P = 0.95$ for mass measurements. When measuring the highest accuracy, it is recommended to use $P = 0.99$ [3].

1.2.1. The problem of constructing the calibration curve of measurement system

In connection with the increase in the requirements for the accuracy of measurements, the number of measuring instruments for which an individual graduation is performed is increasing. In the metrological laboratories activity the most popular and important task is transferring the sizes of units of values from standards to measuring instruments used. When transferring the sizes of units, the method of grading, which not only controls the correspondence of the errors of the verified SI to the established norms, but determines the values of the verified measures, corrections to the indications of devices or builds the calibration curve of the SI, is becoming increasingly widespread. This method gives a minimal loss of accuracy in the transfer of unit sizes, and in many cases the only possible.

The problem of constructing the calibration curve of measuring instruments is an important special case of the general problem of applied mathematics. It concerns the construction of functional dependences from experimental data.

The questions of estimating the errors of the constructed dependencies are often omitted and only methods for estimating random errors are analyzed, while there are no estimates of the systematic errors.

One of the key conditions for increasing accuracy is compliance with normal environmental conditions. But sometimes, you have to make measurements in production conditions, which may differ from normal ones in different degrees. The change in the conditions associated with the impact of certain factors leads to the appearance of an additional error.

Thus, to consider the effect of the environment on indications of the measuring instrument, the most common source of additional error, temperature, will be taken. With the help of a chamber of heat, cold and moisture, it is necessary to create conditions for estimating the influence of the error on temperature [4].

1.2.2 Procedure for constructing a calibration curve

In the construction of CC in the general case, it is recommended to follow the following sequence of operations:

- obtaining initial experimental data $x_i, y_i, i=1, \dots, m$;
- choice of the mode of presentation and functional type of CC;
- choice of the CC construction method;
- estimation of CC parameters and construction of the CC sought;
- estimation of CC errors;
- verification of the adequacy of the CC constructed by the experimental data.

The initial data for constructing individual CC $X_i, Y_i, i = 1, \dots, m$, can be obtained in the course of direct or indirect measurements.

When measuring input and output quantities, there may be cases of a planned or unplanned experiment. In the case of the planned experiment, the researcher selects the values of the input quantities $X_i, i = 1, \dots, m$, at which the output quantities are measured, and the number of observations n_i at each point. To obtain the initial experimental data, the selected values of the input quantities $X_i, i = 1, \dots, m$ are successively reproduced and the corresponding output values Y_i (perform n_i observations) are measured. In the case of an unplanned experiment, the values x_i of input quantities can not be selected by the researcher, but are determined by the experimental conditions. In order to obtain experimental data in this case, each input variable X_i and the corresponding output value $Y_i, i = 1, \dots, m$ are sequentially measured.

In accordance with the formulation of the problem of constructing a CC, the case of a single-factor experiment will be considered.

The method of representing the CC (tabular, graphical or analytical) is determined by:

- the possibility of approximating the CC by a function of a simple analytic form;

- the required accuracy of the CC construction;
- way of using the constructed CC.

The order of the CC construction depends on the method of its representation. When constructing CC in the form of a table, the obtained measurement results are presented in the form of a table (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, m$. When constructing the CC in the form of a graph (without smoothing), one should apply the points (x_i, y_i) to the graph and connect the points by straight lines. In the case of an analytical presentation of CC, the choice of its functional type is performed on the basis of:

- information on the required or possible functional form of the CC;
- physical relationships describing the properties of SI or phenomena underlying their action;
- the results of previous studies of similar SI;
- results of preliminary analysis of the experimental data;
- requirements for the accuracy of CC construction.

The functional form of the CC should be chosen as simple as possible, with a small number of parameters. The most convenient are the CC, in which the parameters enter linearly. If necessary, it is possible to divide the range into separate intervals and construct CC of different types on intervals [5].

1.2.3 Methods for constructing a calibration curve

In the analytical representation of CC, the 3 groups of functional dependencies are most important for work:

- linear;
- non-linear CC of the form $U(Y) = a + bV(X)$;
- linearly changing variables:

$$Y' = a + bX', X' = V(X), Y' = U(Y) \quad (3)$$

- non-linear CC that are linear combinations of known functions:

$$Y = \sum a_j g_j(X), \quad (4)$$

where g_j are known functions;

a_j are the determined coefficients.

In some cases, linear CC can be represented as:

- $Y = a + bX$ is a linear CC of general form;
- $Y = a + b(X - \bar{X})$ is a linear CC, reduced to the midpoint \bar{X} ;
- $Y = bX$ is a linear CC passing through the zero point

Methods for constructing CC are based on the following a priori data:

- on the functional form of CC;
- on the form of the distribution of the random errors in the measurement of the quantities X_i, Y_i , in particular, Gaussian or different from it;
 - on the characteristics of measurement errors X_i, Y_i , in particular, the characteristics can be given a priori or estimated from experimental data; they are constant or variable in the range of values X_i, Y_i , where weights can be given a priori or estimated;
 - on the values of the input quantities X_i , in particular:
 - a) X_i are known exactly (or the errors X_i are negligibly small in comparison with the errors Y_i);
 - b) X_i are known with inaccuracies, but there is additional information about their variances.

If CC has a linear or polynomial form and the values of X_i are known exactly, then to construct the CC, one should use:

- in the case of Gaussian distributions of measurement errors, Y_i is the least squares method (LSM);
- in the case of measurement errors Y_i other than Gaussian distributions, robust methods (truncated LSM or Huber M-estimates).

The main methods for constructing linear CC are given in Table 1 [6].

Table 1. Methods for constructing linear CC

Method No	A priori Information			Methods of constructing CC
	error distribution	variance of errors	argument values X_i	
1	Gaussian	Constants	Exact	LSM
2		Weights are known		LSM with weights
3		Constant	Planned	LSM with allowance for the above errors
4	Close to Gaussian			Exact
5		Weights are known	Truncated LSM with weights	
6			M-Huber estimates	
7	Gaussian	Known σ_x^2 and σ_y^2	Contains errors	Modified LSM
8		Known $\lambda = \sigma_x^2/\sigma_y^2$		Orthogonal regression method
9	Arbitrary	Constant	Known order X_i	Linear fractional estimates
10			Uniform in range	Hausner-Brennan estimate
11			They are divided into 2 or 3 groups	Estimates of Wald or Bartlett

1.2.4. Regression analysis. Least square method

An experimental research of the quantities dependence, the conditions influence on the properties and behavior of the systems and compounds under study is a very important task in the field of accurate measurements. This task allows solving many problems such as:

- construction of calibration dependencies which make it possible to predict the value of conditions that provide a certain result;
- compression (data compaction), when the selected function is used to describe (approximate) a huge array of experimental data;
- approximation of the experimental data by a function with the aim of finding the minimum (maximum) points is an optimization problem.

One of the most developed and frequently used algorithms for regression analysis is the least squares method (LSM). The essence of the method is to minimize the distance between the actual value of the measured quantity and the restored value of the same value. The differences between the actual values of the value and the

recovered ones are called regression residuals (discrepancies, errors). One of the important estimates of the quality criterion of the obtained dependence is the sum of the squares of the residues. This method is used to construct a linear dependence for precisely known values of the input quantities X_i and Gaussian distributions of the measurement errors of the output quantities. In this case, the linear calibration characteristic is represented in the form

$$Y = a_0 + b \cdot (X - \bar{X}), \quad (5)$$

where \bar{X} is the mean (weighted) value of X_i .

Concerning the performance of measurements of the output quantities Y , there are three main cases:

- equivalent single measurements;
- equal multiple measurements;
- uneven measurements with known or estimated weights.

In the case of uneven measurements, when calculating the coefficients and estimating the CC errors, weights w_i of the individual measurement results y_i are used, which determine from estimates of the variances of the random errors of the output quantities, taking into account information on their systematic errors.

If for non-equal measurements:

- the systematic errors of the measurement results y_i are constant or negligible;
- the dependence of the variance of the random errors y_i on the values of the input quantity X_i

$$S_i^2 = S^2 \cdot h(X_i), \quad (6)$$

where $h(X)$ is a function known, then the weights of the results y_i are taken to be equal to

$$w_i = \frac{1}{h(X_i)}. \quad (7)$$

If the systematic errors of the measurement results y_i are constant (negligible) and multiple observations are made at the point X_i , then for the mean value $\bar{y}_i =$

$\sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}/n_i$ take weight $w_i = n_i/S_i^2$, where $S_i^2 = \sum_{j=1}^{n_i} \frac{y_{ij}-\bar{y}_i}{n_i-1}$ is the estimation of the variance of observations at the point X_i .

If, for non-equal multiple measurements at points X_i , the initial components of the systematic errors y_{iq} change irregularly, within predetermined bounds $\pm\theta_{iq}$ and estimates y_{iq} are obtained at the points X_i , then for weights \bar{y}_i we take the weights

$$w_i = (\frac{S_i^2}{n_i} + \sum_{q=1}^k \theta_{iq}^2/3)^{-1}. \quad (8)$$

In the case of unequal measurements, the estimates of the coefficients are calculated by the formulas:

$$a_0 = \bar{Y} = \sum_i^m w_i \bar{y}_i / \sum_i^m w_i, \quad (9)$$

$$b = \sum_i^m w_i \bar{y}_i (X_i - \bar{X})^2 / \sum_i^m w_i (X_i - \bar{X})^2, \quad (10)$$

where $\bar{X} = \sum_i^m w_i X_i / \sum_i^m w_i$, w_i is a weight of results \bar{y}_i [7,8,9].

1.3 Combining separate measurements

1.3.1. The best estimate of a set of measurements

A physical quantity is often measured several times, perhaps in several separate laboratories, and the question arises how these measurements can be combined to give a single best estimate. Suppose, for example, that two students, A and B, measure a quantity x carefully and obtain these results:

$$\text{Student A: } x = x_A \pm \sigma_A, \quad (11)$$

$$\text{Student B: } x = x_B \pm \sigma_B, \quad (12)$$

Each result will be probably the result of several measurements. Since the question is about the calibration curve, the measurements should be carried out at several calibration points, which must be carried out with a certain repetition. Since these repetitions do not differ greatly and do not involve a large error, it is permissible to carry out these measurements less than 15. If the random component is very large, then it makes sense to carry out a large number of repeated measurements

at one point. In most digital devices, the random component is small and not detectable. Therefore, in further measurements, when we consider the measurement result of a single calibration point, we assume that it is the arithmetic average of three repeated measurements.

The question is how to combine x_A and x_B , for a single best estimation of x . If the discrepancy $|x_A - x_B|$ between the two measurements is much greater than both uncertainties σ_A and σ_B , we should suspect that something has gone wrong in at least one of the measurements. In this situation, we would say that the two measurements are inconsistent, and we should examine both measurements carefully to see whether either (or both) was subject to unnoticed systematic errors.

Let us suppose, however, that the two measurements (11) and (12) are consistent; that is, the discrepancy $|x_A - x_B|$ is not significantly larger than both σ_A and σ_B . We can then sensibly ask what the best estimate x_{best} is of the true value X , based on the two measurements. Your first impulse might be to use the average $(x_A + x_B)/2$ of the two measurements. Some reflection should suggest, however, that this average is unsuitable if the two uncertainties σ_A and σ_B are unequal. The simple average $(x_A + x_B)/2$ gives equal importance to both measurements, whereas the more precise reading should somehow be given more weight.

In this paper, it is necessary to use not just the average arithmetic value, but the average (weighted) value of the measurement results, since the variance of each SI instance will be different. Perhaps some copies will have equal variances, for this there is a fundamental reason – either they were made with equal care, or released from one batch. But if at least one device is different, we assume that the measurements are unevenly dispersed and we perform the processing of measurements on the average weighted values. In this way it is possible to reveal the systematic error of SI [10].

1.3.2 The weighted average

We are assuming that both measurement are governed by the Gauss distribution and denote the unknown true value of x by X . Therefore, the probability of Student A 's obtaining his particular value x_A is

$$Prob_X(x_A) \propto \frac{1}{\sigma_A} e^{-(x_A - X)^2 / 2\sigma_A^2}, \quad (13)$$

and that of B 's getting his observed x_B is

$$Prob_X(x_B) \propto \frac{1}{\sigma_B} e^{-(x_B - X)^2 / 2\sigma_B^2}, \quad (14)$$

The subscript X indicates explicitly that these probabilities depend on the unknown actual value.

The probability that A finds the value x_A and B the value x_B is just the product of the two probabilities (13) and (14). In a way that should now be familiar, this product will involve an exponential function whose exponent is the sum of the two exponents in (13) and (14). We write this as

$$Prob_X(x_A, x_B) = Prob_X(x_A) Prob_X(x_B) \propto \frac{1}{\sigma_A \sigma_B} e^{-\chi^2 / 2}, \quad (15)$$

where I have introduced the convenient shorthand χ^2 for the exponent

$$\chi^2 = \left(\frac{x_A - X}{\sigma_A}\right)^2 + \left(\frac{x_B - X}{\sigma_B}\right)^2 \quad (16)$$

This important quantity is the sum of the squares of the deviations from X of the two measurements, each divided by its corresponding uncertainty.

The principle of maximum likelihood asserts, just as before, that our best estimate for the unknown true value X is that value for which the actual observations x_A, x_B are most likely. That is, the best estimate for X is the value for which the probability (15) is maximum or, equivalently, the exponent χ^2 is minimum. (Because maximizing the probability entails minimizing the «sum of squares» χ^2 , this method for estimating X is sometimes called the «method of least squares.») Thus, to find the best estimate, we simply differentiate (16) with respect to X and set the derivative equal to zero,

$$2 \frac{x_A - X}{\sigma_A} + \frac{x_B - X}{\sigma_B} = 0. \quad (17)$$

The solution of this equation for X is our best estimate and is easily seen to be

$$(\text{best estimate for } X) = (\frac{x_A}{\sigma_A^2} + \frac{x_B}{\sigma_B^2}) / (\frac{1}{\sigma_A^2} + \frac{1}{\sigma_B^2}) \quad (18)$$

This equation can be transformed if we determine the weights

$$w_A = \frac{1}{\sigma_A^2} \text{ and } w_B = \frac{1}{\sigma_B^2} \quad (19)$$

With this notation, we can rewrite (18) as the weighted average (denoted x_{wav})

$$(\text{best estimate for } X) = x_{wav} = \frac{w_A x_A + w_B x_B}{w_A + w_B} \quad (20)$$

If the original two measurements are equally uncertain ($\sigma_A = \sigma_B$ and hence $w_A = w_B$), this answer reduces to the simple average $(x_A + x_B)/2$. In general, when $w_A \neq w_B$, the weighted average (20) is not the same as the ordinary average; it is similar to the formula for the center of gravity of two bodies, where w_A and w_B are the actual weights of the two bodies, and x_A and x_B their positions. In (20), the “weights” are the inverse squares of the uncertainties in the original measurements, as in (19). If A’s measurement is more precise than B’s then $\sigma_A < \sigma_B$ and hence $w_A > w_B$, so the best estimate x_{best} is closer to x_A than to x_B , just as it should be.

Our analysis of two measurements can be generalized to cover any number of measurements. Suppose we have N separate measurements of a quantity x ,

$$x_1 \pm \sigma_1, x_2 \pm \sigma_2, \dots, x_N \pm \sigma_N, \quad (21)$$

With their corresponding uncertainties $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N$. Arguing much as before, we find that the best estimate based on these measurements is the weighted average

$$x_{wav} = \frac{\sum w_i x_i}{\sum w_i}, \quad (22)$$

Where the sums are over all N measurements, $i = 1, \dots, N$, and the weight w_i of each measurement is the reciprocal square of the corresponding uncertainty,

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (23)$$

for $i = 1, 2, \dots, N$.

As the weight $w_i = 1/\sigma_i^2$ associated with each measurement involves the square of the corresponding uncertainty σ_i , any measurement that is much less precise than the others contributes very much less to the final answer (22). For

example, if one measurement is four times less precise than the rest, its weight is 16 times less than the other weights, and for many purposes this measurement could simply be ignored.

As the weighted average x_{wav} , is a function of the original measured values x_1, x_2, \dots, x_N , the uncertainty in x_{wav} can be calculated using error propagation. As you can easily check, the uncertainty in x_{wav} is

$$\sigma_{wav} = \frac{1}{\sqrt{\sum w_i}}. \quad (24)$$

This result is perhaps a little easier to remember if we rewrite (23) as

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{w_i}}. \quad (25)$$

Paraphrasing Equation (25), we can say that the uncertainty in each measurement is the reciprocal square root of its weight. Returning to Equation (24), we can paraphrase it similarly to say that the uncertainty in the grand answer x_{wav} is the reciprocal square root of the sum of all the individual weight; in other words, the total weight of the final answer is the sum of the individual weight w_i [11].